

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

«На правах рукопису»
УДК 621.923

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ В.А.Пасічник
(підпис)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 галузеве машинобудування
(код і назва)

на тему: Силові характеристики в магнітно-абразивному інструменті в робочій зоні кільцевого типу

Виконала студентка 6 курсу, групи МІ-71мп
(шифр групи)

Давидюк Ангеліна Ігорівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н , професор Майборода Віктор Станіславович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Механіко-машинобудівний

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А.Пасічник

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Давидюк Ангеліні Ігорівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Силові характеристики магнітно-абразивного інструменту в робочій зоні кільцевого типу»

науковий керівник дисертації д.т.н. , професор Майборода Віктор Станіславович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Магнітно-абразивне оброблення у великих зазорах кільцевого типу

4. Предмет дослідження Силові характеристики, що виникають в магнітно-абразивному інструменті при магнітно-абразивному обробленні

5. Перелік завдань, які потрібно розробити :

1. Виконати аналіз існуючих методів вимірювання силових параметрів в МАІ при МАО.

2. Розробити конструювання пристрою для визначення силового впливу МАІ на оброблювану деталь.

3. Розробити методики визначення силових параметрів в реальних умовах при МАО деталей в робочій зоні кільцевого типу .

4. Дослідити явища, які відбуваються в МАІ за рахунок зміни напруженості магнітного поля , швидкість обертання заготовки навколо осі кільцевої ванни та навколо власної осі та використання різного МАП.

5. Визначити числові значення силових параметрів, що діють на оброблювану деталь в МАІ при МАО.

6. Розробити рекомендацій щодо використання МАО зі стабільними властивостями МАІ в магнітних системах кільцевого типу.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій : дві публікації , що наведені в додатку А

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз існуючих схем та методик оброблення	21.02.2018	
2	Проектування, конструювання пристрою для визначення силового впливу МАІ на оброблювальну деталь	15.04.2018	
3	Розроблення методики визначення силових параметрів в реальних умовах при МАО деталей в робочій зоні кільцевого типу	22.05.2018	
4	Дослідження силового впливу МАІ в робочій зоні кільцевого типу	30.09.2018	
5	6.Розроблення рекомендацій щодо використання МАО зі стабільними властивостями МАІ	1.12.2018	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Давидюк А.І. Силові характеристики магнітно-абразивного інструменту в робочій зоні кільцевого типу.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018

Виконано аналіз теоретичних та експериментальних досліджень існуючих схем магнітно-абразивного оброблення та визначено переваги магнітних систем кільцевого типу.

В роботі досліджено залежність величини ефективного моменту оброблення в умовах великих зазорів в робочій зоні кільцевого типу .

Зроблено висновки ,що оброблення магнітних матеріалів доцільно проводити на невисоких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни, а саме $V=100$ об/хв та високих швидкостях обертання деталей навколо своєї осі (ω) в діапазоні від 800 до 1000 об/хв.

Установлено ,що парамагнітні матеріали, такі як титанові, алюмінієві, магнієві, вольфрамові, молибденові сплави необхідно оброблювати з наявністю немагнітного ВСЕ , щоб попередити витіснення ФАП в нижню частину робочої зони і забезпечити на протязі усього циклу МАО формування стабільного МАІ в робочій зоні та збільшити ефективність оброблення деталей.

Установлено, що при швидкості обертання дослідного зразка з титанового сплаву ВТ-8 при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв та значенні магнітної індукції $B=0,2375$ Тл має місце проявлення дії пондеромоторних сил або ефект псевдозрідження , де величина ефективного моменту різко падає .

Дія пондеромоторних сил спостерігається при швидкості обертання дослідного титанового зразка при $B=0,2375$ Тл та при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=300$ об/хв в зворотньому до попереднього висновку значенні. Тому ці явища потребують додаткового дослідження.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення , магнітно-абразивний інструмент , робоча зона кільцевого типу, ефективний момент , силові характеристики , магнітна індукція .

SUMMARY

Davydyuk A.I. Power characteristics of the magnetic abrasive tool in the working zone of the ring type.

Dissertation for obtaining a Master's degree in specialty 133 - branch mechanical engineering. - National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ". - Kyiv, 2018

The analysis of theoretical and experimental researches of existing schemes of magnetic abrasive treatment and the advantages of circular type magnetic systems are determined.

In this work, the dependence of the magnitude of the effective torque in the conditions of large gaps in the working zone of the ring type is investigated.

It is concluded that it is advisable to handle the processing of magnetic materials at low rotational speeds around the axis of the annular bath, namely, $V=100$ rpm and high rotational speeds of parts around its axis (ω) in the range from 800 to 1000 rpm.

It has been established that paramagnetic materials such as titanium, aluminum, magnesium, tungsten, molybdenum alloys need to be processed with the presence of non-magnetic ALL to prevent the displacement of the FAP in the lower part of the working zone and to ensure throughout the whole cycle of the MAO the formation of a stable MAI in the working zone and to increase efficiency machining parts.

It has been established that at the speed of rotation of the test specimen from the titanium alloy BT-8 at the rotational speed around the axis of the ring bath $V = 200$ rpm and the magnetic induction $B = 0,2375T$ is determined, the action of the ponderomotive forces or the effect of pseudo-fluidization, where the value of the effective moment sharply falls.

The action of the ponderomotive forces is observed at the speed of rotation of the experimental titanium sample at $B = 0.2375T$ and at the speed of rotation around the axis of the ring bath $V = 300$ rpm in the reverse to the previous value. Therefore, these phenomena require additional research.

Key words: magnetic abrasive machining, magnetic abrasive tool, ring type working zone, effective moment, power characteristics, magnetic induction.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВІДОМОСТЕЙ ПРО МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ.....	13
1.1 Аналіз існуючих схем магнітно-абразивного оброблення.....	13
1.2 Магнітно-абразивні порошки, що використовуються при магнітно-абразивному обробленні	18
1.3 Вплив мастильно-охолоджувального технологічного середовища на процес магнітно-абразивного оброблення.....	20
1.4 Фактори, що впливають на сили різання при магнітно-абразивному обробленні.....	21
1.4.1 Магнітне поле.....	21
1.4.2 Величина робочого зазору	22
1.5 Сили, що діють в магнітно-абразивному інструменті при магнітно-абразивному обробленні	22
1.6 Аналіз відомих методів вимірювання сил, що діють в МАІ при МАО	28
1.7 Висновки	32
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, ПРИСТРОЇ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	33
2.1 Верстат для МАО з робочою зоною типу «кільцева ванна»	33
2.2 Установка та методика контролю силових характеристик МАІ опосередкованим методом.....	35
2.3 Умови проведення експериментальних досліджень.....	39
2.4 Пристрій для вимірювання тиску порошку на дослідний зразок при його обертанні навколо робочої зони типу «кільцева ванна».....	41
2.4.1 Принцип роботи пристрою вимірювання тиску порошку на дослідний зразок при його обертанні навколо робочої зони типу «кільцева ванна».....	42

2.4.2 Перевірка тензодатчика на міцність за допомогою програмного забезпечення ANSYS.....	43
2.5 Магнітно-абразивні матеріали та зразки, що використовувались при MAO	49
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	50
3.1 Визначення моменту на шпинделі двигуна при обертанні дослідного зразка у вільній від МАІ робочій зоні типу «кільцева ванна»	50
3.2 Визначення ефективного моменту на шпинделі двигуна при MAO в робочій зоні кільцевого типу	54
3.2.1 Визначення ефективного моменту на шпинделі двигуна при MAO зразків зі сталі 40X13	55
3.2.2 Визначення ефективного моменту на шпинделі двигуна при MAO зразків з титанового сплаву BT-8	60
3.3 Залежність силових характеристик МАІ від швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни	67
3.3.1 Залежність силових характеристик МАІ від швидкості обертання зразків зі сплаву BT-8 навколо осі кільцевої ванни	67
3.3.2 Залежність силових характеристик МАІ від швидкості обертання зразків зі сталі 40X13 навколо осі кільцевої ванни	71
РОЗДІЛ 4. ДІЯ СИЛ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В МАІ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ЗРАЗКІВ В РОБОЧІЙ ЗОНІ ТИПУ «КІЛЬЦЕВА ВАННА»	76
4.1 Умови проведення експерименту.....	76
4.2 Вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни при різних значеннях магнітної індукції на оброблення зразків зі сплаву BT-8	77
4.3 Вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни при різних значеннях магнітної індукції на оброблення зразків зі сталі 40X13	79
4.4 Висновки	80

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	81
5.1 Маркетинговий аналіз стартап проекту	81
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	83
5.3 Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту	84
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	91
5.5 Маркетингова програма стартап-проекту	94
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97
ДОДАТОК А.....	105

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

1. Скорочення

ВСЕ – відновлювальний стрижневий елемент;

МОТС – мастильно-оходжуюче технологічне середовище;

МАІ – магнітно-абразивний інструмент;

МАО – магнітно-абразивне оброблення;

МАП – магнітно-абразивний порошок;

РІ – різальний інструмент;

РК – різальна кромка;

ФАП – фераабразивний порошок.

2. Умовні позначення

В - магнітна індукція

V – швидкість обертання зразків навколо осі кільцевої ванни;

ω – кутова швидкість обертання деталі навколо власної осі;

ρ – кут нахилу оправки відносно горизонтальної осі

λ – характеристика форми та розміру зерен МАП

ВСТУП

Актуальність теми. Перспективним методом фінішного оброблення, який здатен одночасно забезпечувати раціональні параметри шорсткості, мікрогеометрії, фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей різної геометричної форми та з різних матеріалів є магнітно-абразивне оброблення (МАО) в великих робочих зазорах кільцевого типу. Для ефективного оброблення необхідним є підтримання стабільних властивостей та форми магнітно-абразивного інструменту (МАІ) протягом усього технологічного циклу. Тому визначення силових параметрів взаємодії МАІ з оброблювальними поверхнями деталей є актуальною науково-практичною проблемою.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження силових характеристик МАІ в робочій зоні кільцевого типу в залежності від технологічних умов оброблення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналіз існуючих методів вимірювання силових параметрів в МАІ при МАО.
2. Розроблення, програмування та конструювання пристрою для визначення силового впливу МАІ на оброблювану деталь.
3. Розроблення методики визначення силових параметрів в реальних умовах при МАО деталей в робочій зоні кільцевого типу.
4. Дослідження явищ, які відбуваються в МАІ за рахунок зміни напруженості магнітного поля, швидкості обертання заготовки навколо осі кільцевої ванни та навколо власної осі при використанні різного типу магнітно-абразивного порошку.
5. Визначення числових значень силових параметрів, що діють на оброблювану деталь в МАІ при МАО.
6. Розроблення рекомендацій щодо використання МАО зі стабільними властивостями МАІ в магнітних системах кільцевого типу.

Об'єкт дослідження – магнітно-абразивне оброблення у великих магнітних зазорах кільцевого типу.

Предмет дослідження – силові характеристики, що виникають в МАІ при МАО у робочій зоні кільцевого типу.

Методи дослідження – для вирішення поставлених задач дослідження було використано основні положення магнетизму, теорії контактної взаємодії, реології, теорії різання, теорії магнітного поля, механіки контактної взаємодії, математичного моделювання, математичної статистики, матеріалознавства.

Наукова новизна одержаних результатів.

Розроблено методику для визначення зусиль, які діють при взаємодії деталей з магнітно-абразивним інструментом при обробленні в робочій зоні кільцевого типу.

1. Вперше встановлено значення силових параметрів, які діють в магнітно-абразивному середовищі при МАО на циліндричні магнітні та парамагнітні зразки.

2. Визначено вплив швидкості лінійного переміщення вздовж кільцевої ванни та обертання зразків навколо власної осі на умови їх взаємодії з МАІ.

3. Встановлено вплив напруженості магнітного поля при обробленні магнітних та парамагнітних зразків на силові характеристики взаємодії їх з МАІ в робочій зоні кільцевого типу.

4. Вперше встановлено тиск магнітно-абразивного інструменту на циліндричну деталь в робочій зоні кільцевого типу за допомогою прямих вимірювань.

Практичне значення. Розроблена методика дозволила встановити закономірності силових параметрів, які діють на циліндричні зразки виготовлені з магнітних та парамагнітних матеріалів при магнітно-абразивному обробленні в робочій зоні кільцевого типу. Отримані залежності доцільно використовувати для проектування нового обладнання для МАО деталей як простої, так і складної форми виготовлених з різних матеріалів.

Особистий внесок здобувача. Автором сформульовано мету та задачі, що вирішуються в дисертаційній роботі. Запропоновано використовувати розрахункову формулу для визначення корисного моменту. Встановлено закономірності зміни зусиль в МАІ залежно від лінійного переміщення вздовж кільцевої ванни, величини магнітної індукції. Розроблено рекомендації, щодо режимів МАО.

Публікації. Результати дослідження представлено в 2 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, списку використаних джерел із 31 найменування на 4 сторінках та додатків. Основний текст дисертації викладено на 101 сторінці, що містить 28 рисунків, 23 таблиці. Повний обсяг дисертації становить 116 сторінок

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВІДОМОСТЕЙ ПРО МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ

Поняття магнітно-абразивної обробки (МАО) об'єднує велику кількість методів абразивного різання, де застосовується магнітне поле безпосередньо в зоні робочій зоні. За допомогою МАО можна реалізувати такі механічні процеси як: заокруглення гострих кромek, видалення окалини та тонких оксидних плівок, отримання на поверхнях рельєфних зображень, свердлення крихких матеріалів, подрібнення матеріалів, зміцнення металорізальних інструментів, полірування різноманітних по формі деталей різної в'язкості. Наявність магнітного поля в зоні різання дозволяє підвищити якісні характеристики відомих методів абразивного оброблення [1].

1.1 Аналіз існуючих схем магнітно-абразивного оброблення

До теперішнього часу на способи магнітно-абразивного полірування і пристрої для їх відтворення є більше 250 винаходів, і в цьому розмаїтті схем необхідно орієнтуватися. Обмежитися якою-небудь однією ознакою класифікації не можливо, оскільки при виборі тієї чи іншої схеми керуються різними мотивами.

Існують класифікації за відносними рухами [4] деталі, порошку (за рахунок біжного поля) та магнітної системи, видами оброблюваних поверхонь [5], функціональним призначенням енергії магнітного поля, формою оброблюваних поверхонь, типом використовуваного магнітного кондуктора [1, 6, 7].

Автор [8] класифікує схеми і пристрої для МАО, як схеми обробки за формою оброблюваної деталі та відносними рухами деталі та порошку.

У [9] представлено класифікацію по розміру робочого зазору. До

першого типу відносяться схеми, в яких розмір робочого зазору складає $\Lambda \leq (7 \div 10) \cdot \lambda$, де λ – зернистість порошку. Умовно такі робочі будемо називати "малими". До другого типу відносять схеми із шириною робочого зазору $\Lambda \geq (7 \div 10) \cdot \lambda$. Умовно такі робочі будемо називати "великими". Схеми першого типу вимагають створення сил притискання МАП до деталі за допомогою сил магнітного поля і частково за рахунок заклинювання порошку в певних зонах робочої щілини [23]. В схемах другого типу сили притискання МАП до деталі значною мірою створюються за рахунок сил динамічного навантаження при відносних рухах деталі та порошку і, в меншій мірі, за рахунок сил магнітного поля.

Магнітні системи кільцевого типу

У [3] зазначено, що найбільшого поширення при обробленні деталей складної просторової форми отримали схеми, що містять кільцеву ванну і магнітну систему з магнітопроводом, обладнану полюсними наконечниками, що розташовуються на протилежних сторонах камери, в якій знаходиться порошок, а оброблювана деталь здійснює складний рух. Інтенсифікація обробки досягається за рахунок використання полюсних наконечників певної форми або з нанесеними на їх поверхню концентрами магнітного потоку.

Доцільність обробки в системах з кільцевою формою робочої зони обумовлена перевагами, які мають такі магнітні системи:

- потенційно вища продуктивність обробки за рахунок організації обробки за роторним принципом;
- значно ширші можливості в регулюванні технологічних параметрів.

Магнітні системи цього типу надають прості можливості організувати обробку в умовах великих робочих зазорів [3, 6, 8, 9, 31] і при цьому підтримувати сили різання на заданому рівні, забезпечувати рівномірність обробки складних поверхонь можна за рахунок зміни таких параметрів як величина магнітної індукції, швидкість обертання заготовки навколо осі кільцевої ванни, базування деталі в кільцевій ванні, тощо;

- значно вища стабільність характеристик МАІ в часі за рахунок забезпечення перемішування МАП і набагато повільнішого зменшення його кількості в робочій зоні.

Магнітні системи типу "кільцева ванна" діляться на два типи:

- з "радіальним завантаженням" або стаціонарними. Кільцева ванна таких систем утворена торцевими поверхнями кільцевих полюсних наконечників різної полярності.

- з "торцевим завантаженням" (рис. 1.1). Кільцева ванна таких систем утворена внутрішньою циліндричною поверхнею зовнішнього кільцевого та зовнішньою циліндричною поверхнею внутрішнього дискового полюсних наконечників різної полярності.

У [10] описана схема, в якій показані можливості полірування канавок різальних інструментів (рис. 1.2). В основу покладено обертання виробу та переміщення порошку разом з полюсними наконечниками в площині, перпендикулярній до площини обертання виробу. Для здійснення полірування канавок необхідно змістити вісь інструменту щодо осі симетрії полюсних наконечників на певну величину із умови збігу напрямку окружної швидкості полюсного наконечника і дотичної до проекції гвинтової канавки інструменту на торцеву площину полюсного наконечника.

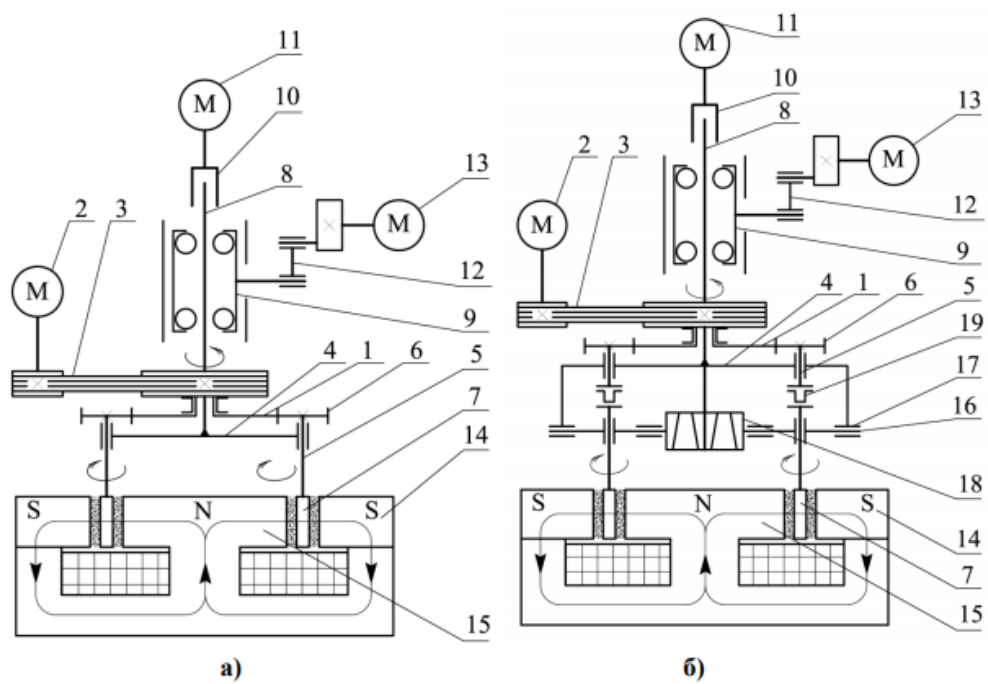


Рисунок 1.1 - Схема оброблення деталей в обертовій кільцевій ванні:
а) за а.с. СРСР № 403537, 508389; б) за а.с. СРСР № 480535

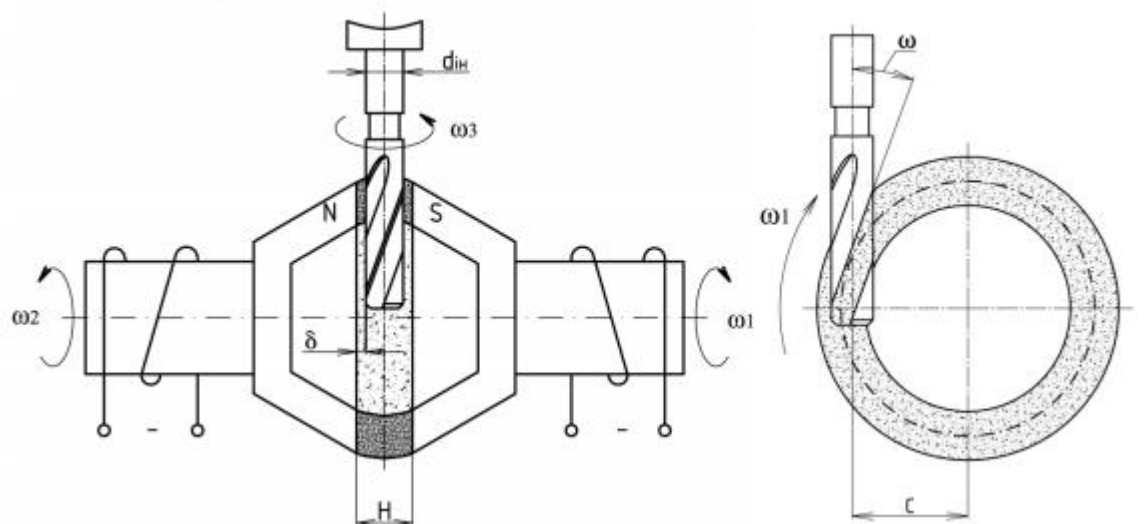


Рисунок 1.2 - Схема оброблення осьового інструменту в обертовій кільцевій ванні за а.с. СРСР № 975357

Також використовують магнітні системи типу "кільцева ванна" для деталей складного профілю, наприклад лопатки ГТД [8, 22]. За цією схемою цими рухами є обертання навколо осі робочої зони та коливання навколо осі Z системи координат розрахункових профілів лопатки (рис. 1.3). При цьому розмах коливання та закон коливання залежить від профілю лопатки і передбачають наявність оптимального кута між напрямом головного руху різання і профілем лопатки [3, 9.]. Це схема обробки в умовах великих робочих зазорів: обертання навколо осі кільцевої ванни є головним рухом різання, а коливання – рухом подачі.

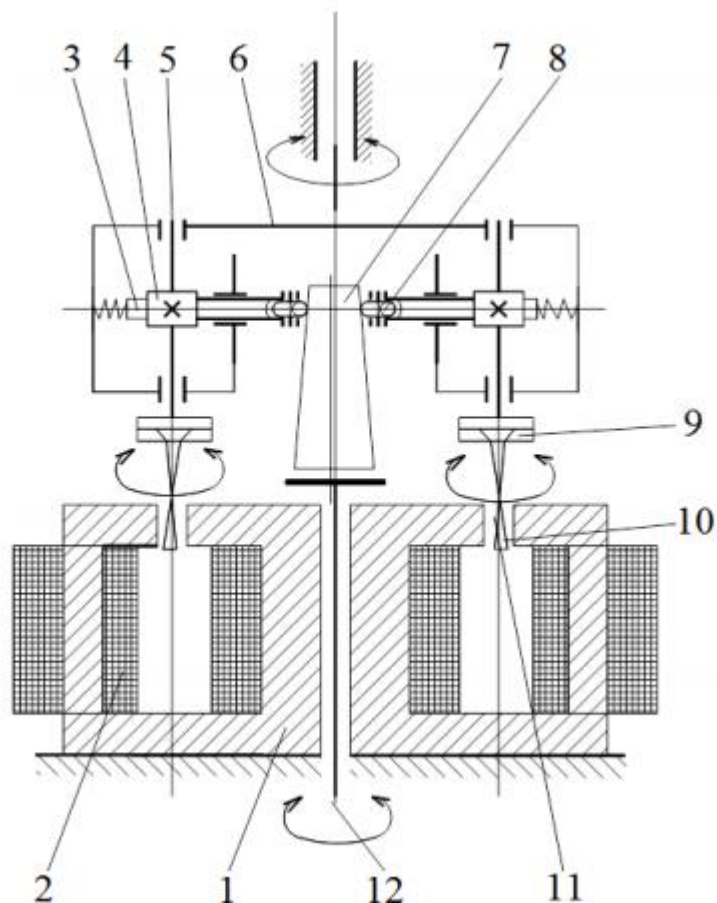


Рисунок 1.3 - Схема установки для МАО лопаток ГТД за пат. України
№ 18814

У роботах [3, 9], описані схеми обробки кінцевого та осьового інструменту в кільцевій ванні в умовах великих робочих зазорів, в яких:

- головним рухом різання є обертання ротору навколо осі кільцевої ванни;
- рухом кругової подачі є обертання деталі навколо власної осі;
- вісь інструменту не перпендикулярна вектору швидкості головного руху, а складає з ним певний кут, тупий або гострий.

Невідмінну від застосування МАО в кільцевій ванні умовах малих робочих зазорів, оброблення в умовах великих робочих зазорів дає такі переваги:

- можливість обробки осьових та кінцевих різальних інструментів (і їм подібних деталей) за рахунок того, що є можливість направити швидкість різання вздовж напрямних кінематичних поверхонь;
- ширше застосування здатності МАІ обтискати оброблювані поверхні за рахунок варіювання такими параметрами МАО: швидкостей відносних рухів оброблюваних деталей та МАП, величини індукції магнітної індукції в робочій зоні [9] та параметри базування деталі в робочій зоні [11]. Таким чином, для деталей складної просторової форми, оброблювані поверхні яких містять напіввідкриті поверхні з малим радіусом кривизни, наприклад, таких як кінцевий, осьовий та дисковий металорізальний інструмент, твердосплавні пластини, дрібномодульні зубчасті колеса, та для лопаток ГТД, найбільш раціональним способом МАО є обробка в магнітній системі типу "кільцева ванна" в умовах великих робочих зазорів.

1.2 Магнітно-абразивні порошки, що використовуються при магнітно- абразивному обробленні

Як фераабразивні порошки (ФАП), застосовують досить велику кількість матеріалів, які мають різні фізичні та спеціальні властивості. Запропоновано кілька класифікацій ФАП. Однак визначеної єдиної класифікації магнітно-абразивних порошків не існує.

Найбільш прийнятною є класифікації за структурою частинок порошку

і за способом їх отримання. Відповідно до цих підходів окремо можна виділити магнітно-абразивний інструмент, який складається з механічних сумішей (МС) магнітних і абразивних складових. У якості магнітної складової найчастіше застосовують порошки звичайного або легованого заліза, а також, спеціально для роботи в змінних магнітних полях, - порошки магнітно твердих сплавів (Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-Co, феритів).

Абразивна складова в МС може включати практично всі відомі абразивні матеріали (алмаз, ельбор, корунд, карбід кремнію, карбід інструменту. В результаті можливе створення ФАП практично будь-якої конфігурації з можливістю керування інтегральною твердістю.

Дослідження різних порошкових матеріалів для МАО показали, що ефективність обробки в значній мірі залежить від форми зерен ФАП. При МАО велике значення на ефективність обробки впливає не тільки матеріал порошку, а й стан різальних кромek зерен ФАП. Основними геометричними параметрами, що визначають різальну здатність ферабразивного зерна, є форма зерен, число вершин (різальних кромek), кути при вершинах і радіуси округлення вершин.

У зерен ФАП, як правило, відсутня правильна геометрична форма. Серед них зустрічаються зерна, подібні октаедру, тригональному трапецоїду, ромбічній тетраедру, тригранній призмі, кулястим многогранників і т.д. Деякі зерна бувають подовженими, голкоподібними, мечоподібними, пластинчастими. Форма зерен ФАП залежить від матеріалів магнітної і абразивної складових, технології їх отримання, зернистості і інших чинників. Можна виділити три типові форми зерен, які визначаються насамперед способом їх виготовлення:

- осколкові зерна, отримані в результаті розмелу гранульованих розплавлених матеріалів, які мають практично непористу структуру. До порошків з такою структурою можна віднести ПОЛІМАМ-Т; ФЕРОМАП; порошок на основі аморфного заліза;

- округлі зерна, отримані в результаті розплаву, без подальшого розмелу.

Прикладами таких порошків є: порошок на основі Р6М5, ПОЛІМАМ-М, ЦАРАМАМ;

- зерна-конгломерати, отримані шляхом спікання і подальшого розмелу брикетів. ФАП з такою формою зерен мають високу пористість, незначну механічну силу зчеплення абразивної і феромагнітної складової. Прикладом таких порошків можуть бути порошки отримані за керметною технологією.

Зерна ФАП мають різну геометричну форму. Різниця в формі зерен порошків одного складу або походження обумовлена способом їх отримання, додатковим обробленням, методом класифікації та іншими факторами. Необхідно мати повну інформацію про характерні розміри зерен порошків, які використовуються в процесі обробки.

Це пов'язано з тим, що при МАО використовують порошкові матеріали з досить широким складом фракцій: від 20 до 800 мкм. Більшість ферабразивних зерен мають кілька вершин, утворених тупими кутами, з певними радіусами їх округлення. кількість вершин на абразивному зерні, а також їх кути і радіуси округлення залежать від марки ФАП і його зернистості. Ферабразивне зерно, як правило, має кілька граней, які утворюють в перетинах кути при вершинах. У більшості зерен є кілька вершин, кожна з яких характеризується певним кутом і радіусом округлення. [2, 27].

1.3 Вплив мастильно-охолоджувального технологічного середовища на процес магнітно-абразивного оброблення

При МАО слід виділити локальну, контактну і загальну сталу температуру. Основними чинниками, що впливають на потужність теплового джерела є сили різання. Вони визначаються інтенсивністю тертя і деформації при контакті поверхонь ферабразивної щітки і деталі в локальній зоні і швидкістю різання.

Одним із шляхів зниження теплової напруженості, а, отже, і мінімізації дефектів процесу МАО, є застосування мастильно-охолоджуючих

технологічних засобів (МОТС). Їх дії проявляється головним чином в наступних напрямках:

1. МОТС можуть впливати на зміну сил різання.
2. МОТС можуть істотно змінювати інтенсивність затуплення зерен.
3. МОТС при МАО сталей і сплавів впливають на інтенсивність теплоутворення, розподіл тепла, температур зоні контакту. [2, 20, 30].

1.4 Фактори, що впливають на сили різання при магнітно-абразивному обробленні

1.4.1 Магнітне поле

Збільшення магнітної індукції в робочих зазорах до певного моменту супроводжується ростом усіх трьох компонентів сил різання. По мірі магнітного насичення порошкової маси, що заповнює робочі зазори, картина магнітного поля на кордонах робочих зазорів змінюється; збільшується їх магнітне опір, яке стає близьким але величині магнітного опору сусідніх повітряних ділянок, які є шляхами проходження магнітних потоків витоків. У зв'язку з цим щільності магнітних потоків витоків і основного потоку, що пронизує робочий зазор, стають порівнянними, а градієнт магнітної індукції на кордонах робочого зазору наближається до нуля. Найбільш сприятливими значеннями магнітної індукції є $B = 0,8-1,2$ Тл. Створювати більш високу магнітну індукцію в робочих зазорах немає необхідності, оскільки це, поряд зі збільшенням нормальних сил різання, погіршує умови утримування порошку в робочих зазорах і, крім того, вимагає різкого збільшення потужності обмоток електромагнітного індуктора.

1.4.2 Величина робочого зазору

Збільшення Λ послаблює магнітний потік всередині робочого зазору, зменшуючи при цьому і сили різання. З'являється нерівномірність магнітного потоку на всій дузі робочого зазору і разом з нею - сили різання, уздовж всієї дуги робочого зазору. Через малі значень градієнту магнітної індукції, уздовж дуги робочого зазору (в тому числі і на виході з нього) сили різання невеликі і забезпечити інтенсивне полірування і надійне утримування порошку в зоні обробки не в змозі. Разом з тим при цьому з'являються умови для виникнення коливальних рухів ланцюжків зерен, однак в результаті низької інтенсивності полірування при великих значеннях Λ така схема обробки не знаходить застосування. Вплив Λ на інтенсивність різання, вимірювану зніманням металу за першу хвилину обробки, і на стійкість (збереження) порції порошку можна простежити по залежності 1.1 :

$$Q = qtb, \quad (1.1)$$

Збільшення Λ дозволяє розмістити в робочих зазорах велику порцію порошку. Зерна порошку в цьому випадку мають велику свободу переміщень усередині зазору, необхідних для здійснення самозагострення порошкової маси. Стійкість порції порошку і інтенсивність різання збільшуються. Надмірне збільшення Λ і відповідно магнітного опору робочих зазорів приводить до появи великих потоків витoku, зниження тангенціальних магнітних сил і до поганого утримування порошку в зазорах.

1.5 Сили, що діють в магнітно-абразивному інструменті при магнітно-абразивному обробленні

Загальним для всіх відомих схем МАО є те, що:

- роль різального інструменту виконує порція ФАП;

- заготовку розміщують між полюсами магнітного індуктора або поруч з ними;
- простір між індуктором і заготівлею частково або повністю заповнюють ФАП.

Відомим є те, що основним при МАО є тиск ФАП на оброблювану поверхню деталі. Тиск ФАП визначає характер протікання абразивної дії. На кожне зерно ФАП, що знаходиться в робочому зазорі діє комплекс сил магнітного, електричного та механічного походження. На сукупність сил впливають магнітне поле, матеріал порошку, схема обробки, механічні характеристики порошкового середовища, форма і розмір зерен, властивості МОТС.

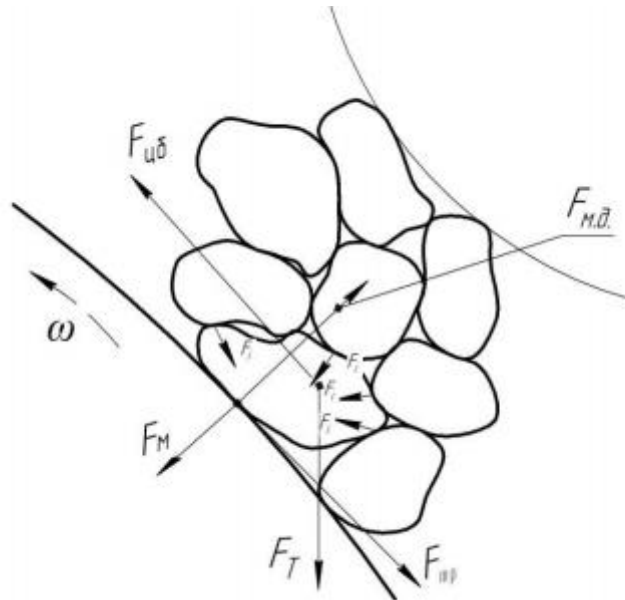


Рисунок 1.4 – Схема сил, що діють на зерна ФАП

Результуюча сила F – це сумарний вектор таких сил, як магнітна сила F_m , сила інерції F_i , центробіжна сила $F_{ц}$, сила механічного тиску $F_{мт}$, сила тертя $F_{тр}$, сила тяжіння F_T .

В різних методах МАО діють всі або частина цих складових результуючої сили. Числове значення сили механічної дії та сили тертя на кожне зерно може бути отримане лише при розрахунку взаємодії в робочому

зазорі.

При обробці матеріалів з низькою магнітною проникністю значення результуючої сили незначне і виникає необхідність компенсувати магнітну силу для більш продуктивної обробки .

Для збільшення тиску, що діє на зерно ФАП необхідно штучно створити додаткові сили, які дозволять збільшити результуючу та усилити процес МАО [3].

Виявлення магнітної сили F_m допоможе передбачити поведінку окремого зерна при наданні руху заготовці або полюсу . Знаходячись в середній зоні робочого зазору прижаті до заготовки зерно ФАП рухається разом з нею до границі робочого зазору під дією сили тертя, що до неї направлена.

Барон Ю.М привів вірогідні значення сил, що діють на зерно порошку в процесі МАО для конкретних умов : магнітна індукція в точці розташування зерна $B=1 \dots 4 \text{ Тл}$, просторовий градієнт поля в цій же точці $\text{grad } B = 0,1 \dots 0,5 \text{ Тл/мм}$; відносна магнітна проникність матеріалу порошку в монолітному стані $\mu'_m = 2 \dots 2,6$, а в порошковому стані $\mu'_n = 1,1 \dots 1,5$; питомий електричний опір матеріалу порошку $\rho_m = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; щільність матеріалу зерна $\gamma = 7,9 \text{ г/см}^3$; швидкість головного руху $V = \leq 2 \text{ м/с}$; швидкість переміщення зерен всередині робочого зазору $V_z = 0,02 \text{ м/с}$; параметри осцилюючого руху зерен з полюсом $A = 1,5 \text{ мм}$; $\omega = 15 \text{ Гц}$; розмір сферичного зерна $d = 0,25 \text{ мм}$; розмір еліпсоїдного зерна $d = 0,25 \text{ мм}$; $l = 0,25 \text{ мм}$; $b = c = 0,125 \text{ мм}$.

Приведені дані (табл.1.1) дозволяють спростити розрахунки сил різання, обмежившись розгляданням лише магнітних, інерційних та відцентрових сил.

Таблиця 1.1 - Вірогідні значення сил, що діють на зерно порошку
в процесі МАО

Фізична сила	Позначення	Значення сили, Н
Магнітна сила, визвана взаємодією молекулярних токів матеріалу зерна з зовнішнім полем	F_M	$(2..10) \cdot 10^{-4}$
Додаткова магнітна сила, викликана прагненням еліпсоїдного зерна орієнтуватись вздовж силових ліній поля	F_{M1}	$(7...15) \cdot 10^{-4}$
Електромагнітна сила взаємодії індукційних токів зерна з зовнішнім пульсуючим полем	F_{em}	$(2...12) \cdot 10^{-9}$
Електромагнітна сила взаємодії індукційних токів зерна в робочому зазорі	F_{em1}	$4 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$
Сила тяжіння	F_T	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Сила інерції, що виникає при зіткненні зерна, що рухається з оброблюваною поверхнею	$F_{ин}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$
Відцентрова сила, що виникає при обертанні зерна з магнітним індуктором	$F_{вц}$	$(1...1) \cdot 10^{-6}$

Автор [1] заклав в ідею розрахунку сил різання. Він визначив, що розрахунок нормальних і тангенціальних складових сили різання зводиться до розрахунку розподілу тиску і питомих сил тертя на поверхні заготовки. Першою була представлена методика розрахунку тиску в статиці. При цьому були використані такі вихідні дані: розміри та форма робочого зазору, розподіл плоского магнітного поля в рамках заповненої порошком області. Розглянутий метод не враховував, що дія прикладених навантажень частково компенсується силами тертя порошку на поверхні полюсу і заготовки, в результаті чого напруженість в вузлах сітки від кожного сконцентрованого навантаження повинні мати значення менші, ніж розраховані. В зв'язку з цим

була запропонована більш точна методика розрахунку, що застосовувалась до умов руху заготовки відносно полюса і започаткована на положеннях теорії механіки лінійно деформованих зернистих середовищ. Згідно з нею, сконцентроване навантаження, прикладене до поверхонь нескінченного півпростору, зайнятого зернистим середовищем, створює напружений стан не тільки для одиничних об'ємів, а і для всіх точок півпростору. Для ілюстрації послідовності розрахунку сил в умовах заготовки, що рухається було розроблено наступний алгоритм:

1. Визначення області бокових границь .
2. Знаходження розподілу магнітного поля всередині цієї області.
3. Обчислення магнітних тисків і об'ємного розподілу сил.
4. Розрахунок тисків на границях області без урахування сил тертя з заготовкою.
5. Попередній розрахунок сил тертя.
6. Уточнення тисків і сил тертя.
7. Перевірка рівноваги області.

При поліруванні циліндричного зразка в робочій зоні кільцевого типу епюра нормальних тисків порошку має форму , що показана на рисунку 1.5 цільною лінією. Не зважаючи на те, що заготовка повністю занурена у МАП , обробка проходить лише на тій частині дуги її кола, коли заготовка виконує три робочі рухи: обертання V , осциляцію V_{oc} та поступовий рух V_n .

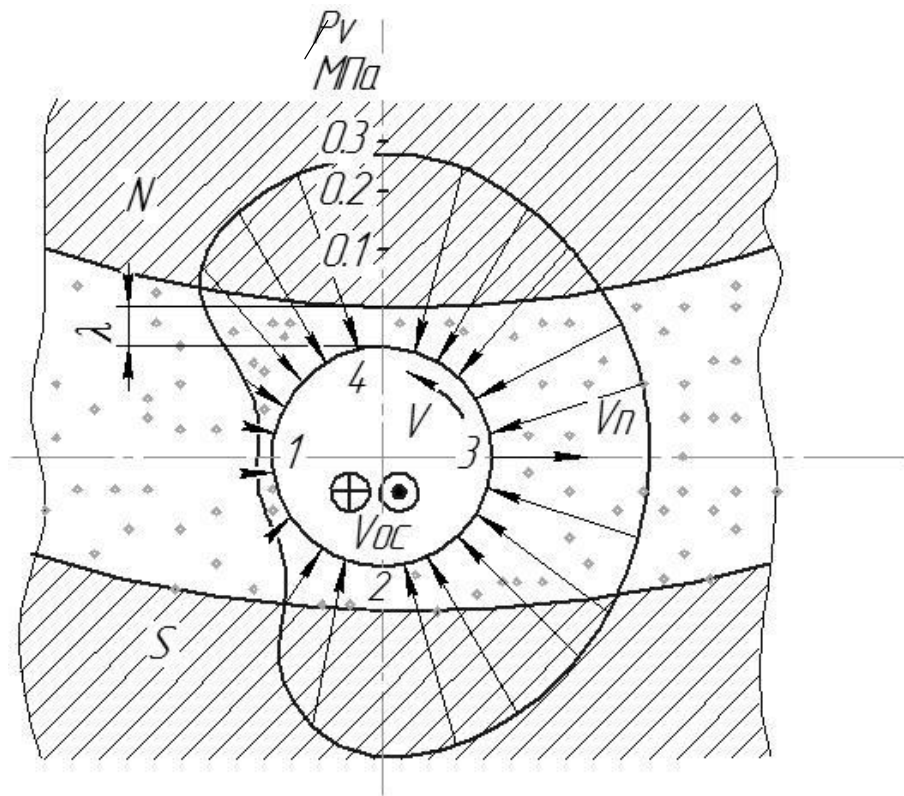


Рисунок 1.5 – Епюра розподілу нормальних тисків при МАО в
робочій зоні кільцевого типу

Різка різниця між тисками на передній та задній ділянках поверхні, що обробляється обумовлена наявністю підпору порошкової маси, що рухається на заготовку [1].

Бароном Ю.М ці значення були визначені для малих робочих зазорів. При МАО в умовах великих магнітних зазорів велике значення мають динамічні складові сил взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями, тому магнітні сили, сила тяжіння, сила інерції, відцентрова сила у даному випадку не враховуються.

У [12] автор показує, що в процесі МАО на деталь діє сумарна динамічна сила взаємодії МАІ з кожною точкою оброблюваної поверхні F_v , що рівна сумі нормальної та тангенціальної складової (рис. 1.6). В точці 1 максимальну величину має нормальна сила взаємодії F_n , яка викликає розрив формувань МАІ в точці контакту, а тангенціальна $F_t \approx 0$, при цьому порошок

починає огинати деталь і поступово співвідношення сил змінюється – тангенціальна збільшується, а нормальна зменшується, як це показано для точки 2. В точці 1 відбувається ударна взаємодія. Поступово величина F_n зменшується до 0 в точці 3, в якій F_t максимальна і відбувається переважна фрикційна взаємодія 10 формувань МАІ з ділянкою оброблюваної поверхні, притискання зерен до поверхні здійснюється за рахунок магнітної сили і частково сил "заклинювання" між бічною поверхнею деталі та полюсним наконечником або "мертвою" зоною. Далі частина поверхні знаходиться у "тіньовій" зоні, з нею контактують лише конусоподібні стовпчики, які замикаються за рухомою деталлю. Тому для рівномірного оброблення деталей такого типу безумовно потрібно виконувати обертання навколо власної осі, що важливо для осевого РІ.

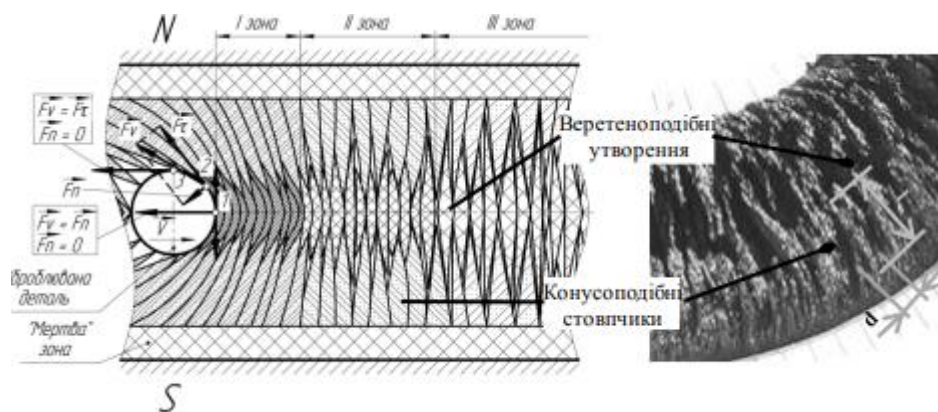


Рисунок 1. 6 – Схема взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями деталі та зовнішній вигляд МАІ в робочому стані

1.6 Аналіз відомих методів вимірювання сил, що діють в МАІ при МАО

Майборода В.С [3] у своїй роботі розробив методику контролю опору, що чинить порошок на рух деталей, базований на вимірі струму

електродвигуна, який обертається. Для цієї цілі було використано компенсаційну схему. Тарування системи здійснює мулінетка. Тарувальна залежність має лінійний характер, тому при перерозрахунку показників приладу вводиться тарувальний коефіцієнт, що рівний для даного випадку 26,826г/мм.

Після проведення експерименту і їх первинної математичної обробки, що виконана з застосуванням ЕОМ, були отримані залежності, і представленні на рисунку 1.7. По залежності чітко видно, що в початковій стадії процесу оброблення різко зростає навантаження, що прикладене до деталі, що відповідає процесу переформування маси магнітно-абразивного порошку, початково рівномірно розподіленого в зонах обробки. Установлено, що максимальне значення опору порошку на деталь, а це означає, що його загальна щільність буде змінюватись в залежності від напруженості магнітного поля, розміру частинок магнітного порошку і швидкості руху деталі.

Також в роботі установлено, що зі зростанням швидкості руху деталей внесок складових сил магнітного походження у величину тиску частинок МАІ на заготовку буде зменшуватись по відношенню до внеску сил динамічного походження, що визначається. Визначені коефіцієнти переформування для різних умов МАО. Виділені статична і динамічна складова коефіцієнтів переформування, відношення яких визначає числа магнітного тиску. Показано, що його величина змінюється в діапазоні від 2 до 10.

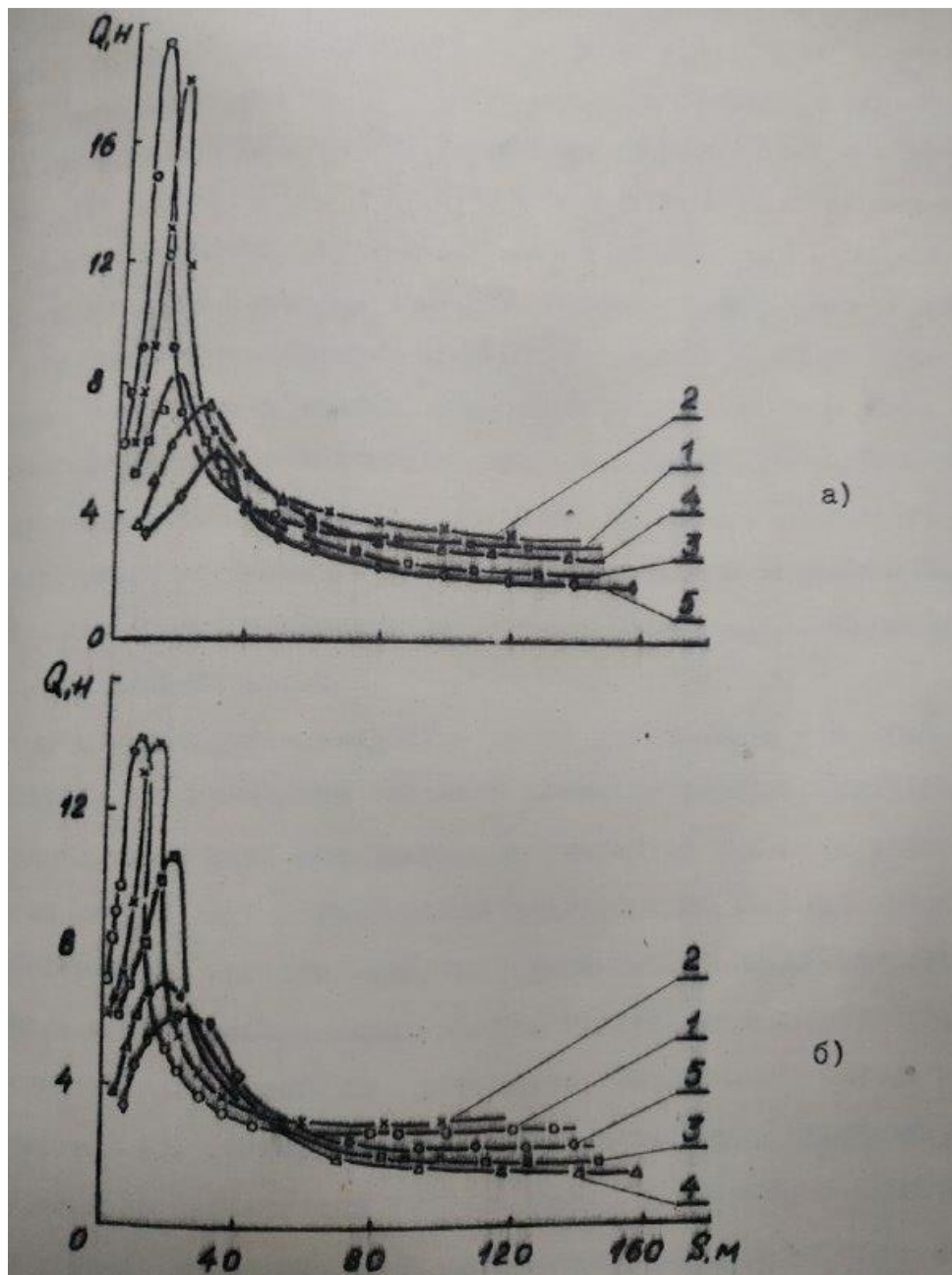


Рисунок 1.7 – Зміна сил опору , що чинить МАІ на рух деталі в залежності від довжини шляху, який проходить деталь в зонах оброблення

При загальмованому якорі виконували виміри сили струму I , що споживає двигун , різних значень напруги U , що задавались від джерела живлення. Виміри величини I виконували не менше 5 разів при різних положеннях якоря. У результаті отримана залежність зміни опору електричного двигуна $r_{дв.}$ від величини струму.

Розрахунок моменту холостого ходу були виконані при різних значеннях напруженості магнітного поля в магнітній системі. Розмір моменту холостого хода визначався як :

$$M_{xx} = \frac{U \cdot I - I^2 \cdot r_{дв}}{\omega}, \quad (1.2)$$

де U і I – відповідно напруга і струм на двигуні при даній частоті обертання ω .

$r_{дв}$ – опір двигуна, визначений по залежності .

Величину корисного моменту двигуна при навантаженій в процесі МАО заготовки визначили за значеннями споживаного струму I_n , напруги U_n і частоті обертання ω , з врахуванням теплових, механічних втрат у редукторі при обмірюваному значенні струму I_n .

Тоді

$$M_{пол.} = M_{ем.} - M_{xx}. \quad (1.3)$$

В результаті розроблена методика, яка дозволяє врахувати і виключити теплові ,електромеханічні і механічні втрати в двигуні при іспитах. Контроль величини площі безпосереднього активного контакту МАІ з поверхнею виконувався для кожного досліджуваного порошку і величини магнітної індукції шляхом контролю величини площі оброблювальної поверхні.

Вище перераховані методи показують що в залежності від певних факторів сили змінюються , але не дозволяють розрахувати реальні числові значення сил, що діють в МАІ при МАО .

1.7 Висновки

1. Доцільність обробки на установках з кільцевою формою робочої зони обумовлена перевагами, такими як потенційно вища продуктивність обробки за рахунок обробки за роторним принципом та значно ширші можливості в регулюванні технологічних параметрів.

2. Основним фактором при МАО є тиск МАІ, що визначає характер протікання абразивної дії на оброблювану поверхню деталі.

3. Більшість досліджень силових характеристик були виконані для МАО в умовах малих робочих зазорів, тому дослідження їх в умовах великих робочих зазорів є актуальним для науково-технологічного прогресу.

4. Відомі методи визначення силових характеристик в умовах великих робочих зазорів показують що в залежності від певних факторів сили змінюються, але не дозволяють розрахувати реальні числові значення сил, що діють в МАІ при МАО.

Метою роботи є дослідження силових характеристик МАІ в робочій зоні кільцевого типу в залежності від технологічних умов оброблення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналіз існуючих методів вимірювання силових параметрів в МАІ при МАО.

2. Розроблення, програмування та конструювання пристрою для визначення силового впливу МАІ на оброблювану деталь.

3. Розроблення методики визначення силових параметрів в реальних умовах при МАО деталей в робочій зоні кільцевого типу.

4. Дослідження явищ, які відбуваються в МАІ за рахунок зміни напруженості магнітного поля, швидкості обертання заготовки навколо осі кільцевої ванни та навколо власної осі при використанні різного типу магнітно-абразивного порошку.

5. Визначення числових значень силових параметрів, що діють на оброблювану деталь в МАІ при МАО.

6. Розроблення рекомендацій щодо використання МАО зі стабільними властивостями МАІ в магнітних системах кільцевого типу.

РОЗДІЛ 2

ОБЛАДНАННЯ, ПРИСТРОЇ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Верстат для МАО з робочою зоною типу «кільцева ванна»

Експериментальна установка типу "кільцева ванна" є універсальною і призначена для МАО різального інструменту (Р)І, лопаток газотурбінних двигунів, циліндричних та інших складнопрофільних деталей. Вона змонтована на базі вертикально фрезерного верстата ОЦ «Іжевськ» у Національному технічному університеті України «КПІ ім. І. Сікорського» (рис. 2.1). Така схема забезпечує базування оброблюваних деталей під необхідними кутами p та q .

Технологічне налагодження до вертикально-фрезерного верстату складається з магнітної системи (1), встановленої на нерухомому горизонтальному робочому столі та універсальної головки (4), що кріпиться до шпинделя верстата, який має можливість рухатися у вертикальному напрямку. Вісь шпинделя співпадає з вертикальною віссю магнітної системи.

Магнітна система установки складається із магнітопроводів, чотирьох котушок електромагнітів (не показано) і двох кільцевидних коаксіально направлених полюсних наконечників (1), які формують робочу зону (2), що заповнюється МАП. Діаметр кільцевої ванни дорівнює 200 мм, висота 30 мм, ширина – 35 мм.

Така конструкція дає можливість обробляти деталі з різною просторовою формою та в широких межах їх розмірів. Магнітна індукція у вільному від МАП міжполюсному просторі може регульовано змінюватись в межах 0,02 – 0,5 Тл, що достатньо для використовуваної схеми МАО.

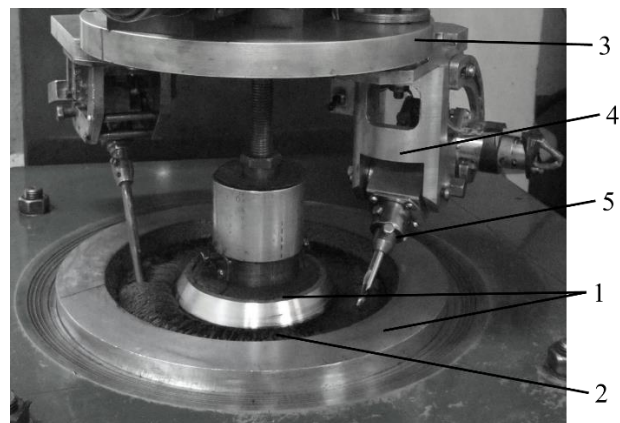


Рисунок. 2.1 – Експериментальна установка типу "кільцева ванна"

Для оброблення дослідних зразків і РІ використовується універсальна головка, яка встановлюється в шпинделі верстату. Її вертикальна вісь співпадає з віссю магнітної системи і шпинделя верстату, і являє собою базову плиту (3), на якій з одного боку закріплюється пристрій з можливістю повороту навколо вертикальної осі з мінішпинделем (4) в якому встановлено оправка з РІ (5), що може вільно обертатися навколо власної осі та осі мінішпинделя. Мінішпиндель з'єднано з двигуном постійного струму через редуктор, які забезпечують обертання деталі навколо власної осі з регульованою кутовою швидкістю в діапазоні 0 – 300 об/хв. Додатково на плиті, радіально до встановленого мінішпинделя, розташовується другий змінний мінішпиндель спрощеної конструкції, що не передбачає обертання деталі навколо власної осі, має можливість керованого повороту навколо вертикальної осі і використовується для встановлення в ньому додаткового формоутворюючого МАІ елементу. Основний і додатковий мінішпинделі

мають можливість розташовуватися під різними кутами по відношенню до дотичної до середньої лінії кільцевої ванни. При МАО оброблювана деталь, закріплена на оправці, може обертатися навколо осі кільцевої ванни разом з універсальною головкою та навколо власної осі. Оброблення можливо виконувати при різних режимах – в умовах «натікання» та «стікання» феромагнітного середовища з поверхонь деталей.

В процесі МАО формується МАІ, який представляє собою сукупність феромагнітних частинок порошку, які під дією сил магнітного і електромагнітного походження, при переміщенні оброблюваних деталей в магнітних щілинах групуються між собою, утворюючи особливі конусоподібні та веретеноподібні квазістабільні формування, які структуруються певним чином [16].

При МАО в умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу одним з найважливіших параметрів, від якого залежить ефективність оброблення є динамічний чинник. Тому визначення умов взаємодії МАІ та оброблюваних поверхонь і особливо величини швидкості, є важливим як для цілеспрямованого керування властивостями МАІ так і для прогнозованої та чітко визначеної поведінки порошкового матеріалу в робочих зонах кільцевого типу. Як було визначено в роботі [38], саме швидкість руху деталей вздовж робочої зони є визначальним фактором кінематики процесу МАО, а обертання деталей навколо власної осі вносить значно менший вклад.

2.2 Установка та методика контролю силових характеристик МАІ опосередкованим методом

Для вимірювання частоти обертання шпинделя 1 була застосована схема безконтактного вимірювання частоти обертання, що наведена на рис. 2.2

Вимірювання частоти обертання шпинделя відбувається наступним чином:

На валу шпинделя 1 де на виході з другої сторони закріплено диск з вісьмома магнітами, за допомогою яких передаються імпульси на датчик Холла 2, від датчика дані поступають на оброблення до плати Arduino №1 3, що закріплена на універсальній головці. Плата 3 бере живлення від джерела струму 5 що живиться від 9V акумулятора 6. Після оброблення даних на АЦП вони передаються за допомогою Bluetooth пристрою 4 на плату ардуіно №2 7, яка в свою чергу аналізує дані та виводить їх на екран 8. Плата 7 живиться від джерела постійного струму 9.

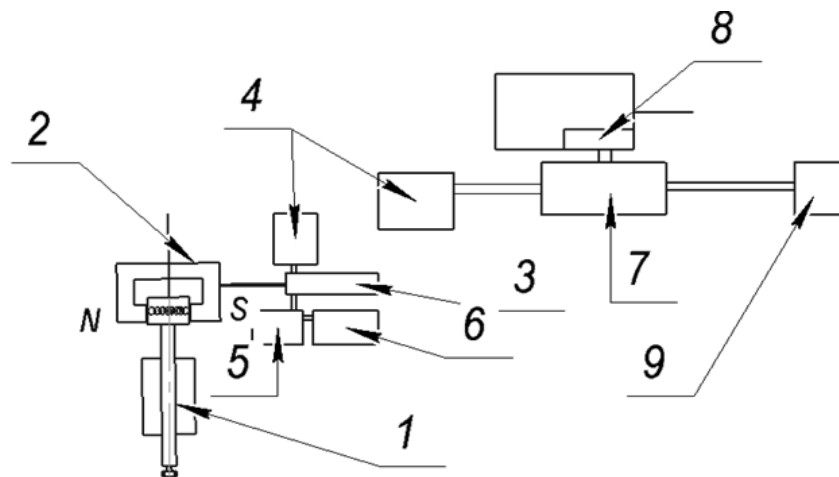


Рисунок 2.2 – Схема безконтактного вимірювання частоти обертання шпинделя

У вимірювальну схему магнітно-абразивної установки входить (рис. 2.3, рис. 2.4): магнітна система, що складається із магнітопроводу 1, котушок електромагніту 2 і полюсних наконечників 9.

Оброблювані деталі при експериментальних дослідженнях встановлюють на шпинделі 3, та розташовують в робочій зоні, що сформована полюсними наконечниками 9. На шпинделі разом з оброблюваними деталями на валу закріплено диск з вісьмома магнітами та датчиком Холла, для вимірювання частоти обертання шпинделя. На корпусі шпинделя закріплено блок, виконаний на базі Arduino з безпроводним передавачем Bluetooth та

аккумулятором живлення для безпосереднього вимірювання частоти обертання шпинделя в реальному часі.

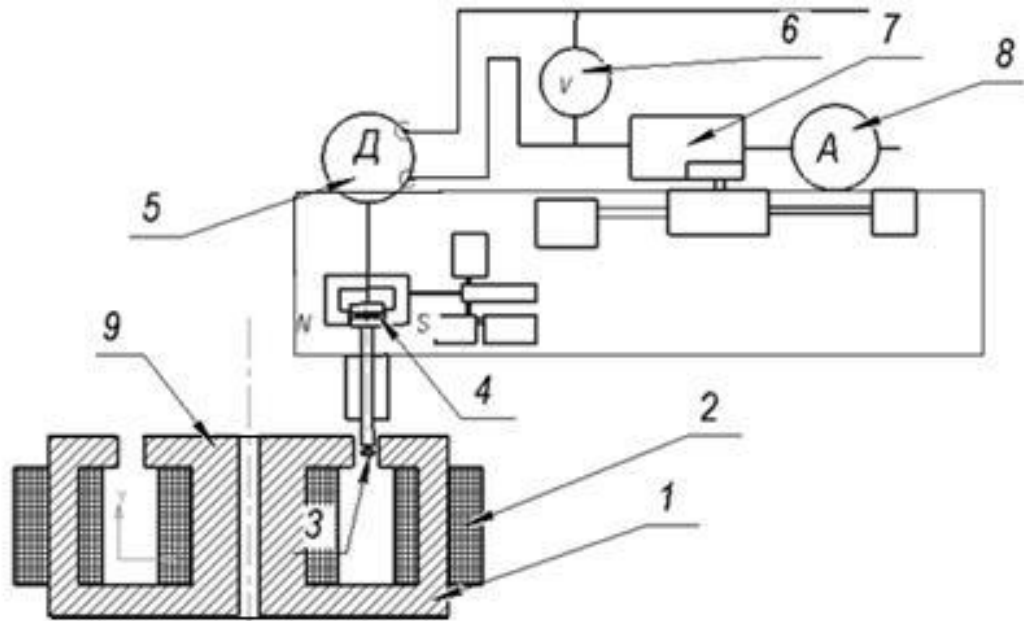


Рисунок 2.3 – Схема зняття вимірів сили струму, напруги, та частоти обертання шпинделя

У схему вимірювання опору двигуна 5 входять (рис. 2.3): регульоване джерело постійного струму 7, амперметр 8 та вольтметр 6 стрілкових типів. Двигун 5 та черв'ячний редуктор на шпинделі забезпечують регулювання частоти обертання деталі навколо власної осі обертання в діапазоні від 0 до 1000 об/хв.

Контроль сил, що діють на поверхню деталі, під час МАО, здійснюється шляхом визначення корисного моменту на валу шпинделя 3 (рис.2.3).



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд приладів та схеми вимірювання напруги сил току і частоти обертання шпинделя

Для цього спочатку визначено залежність загального електричного опору двигуна від величини струму шляхом виміри споживаного двигуном струму I при різних значеннях величини напруги U , що задаються від джерела постійного струму 7 при загальмованому якорі. При відсутності навантаження на шпинделі 4, яке буде мати місце при МАО, було визначено значення опору двигуна и момент холостого ходу при обертання оправки навколо осі кільцевої робочої зони проти стрілки годинника, та обертання оправки навколо власної осі за стрілкою годинника.

Опір двигуна, який використовується в складі установки при загальмованому якорі, виконували виміри споживаного двигуном струму I при різних значеннях величини напруги U , що задаються від джерела постійного струму 7. Виміри величини струму I виконували декілька разів при різних

положеннях якоря. У результаті обробки отриманих результатів одержано залежність зміни електричного опору двигуна :

$$r_{\text{дв.}} = \frac{U_{\text{дв.}}}{I_{\text{дв.}}} \quad (2.1)$$

В додатках наведені значення сили току та напруги $r_{\text{дв.}} = \frac{U_{\text{дв.}}}{I_{\text{дв.}}} = \frac{4,5}{7,08} = 0,64 \text{ Ом}$. На рис. 2.5 зображено залежність опору залежно від величини сили струму.

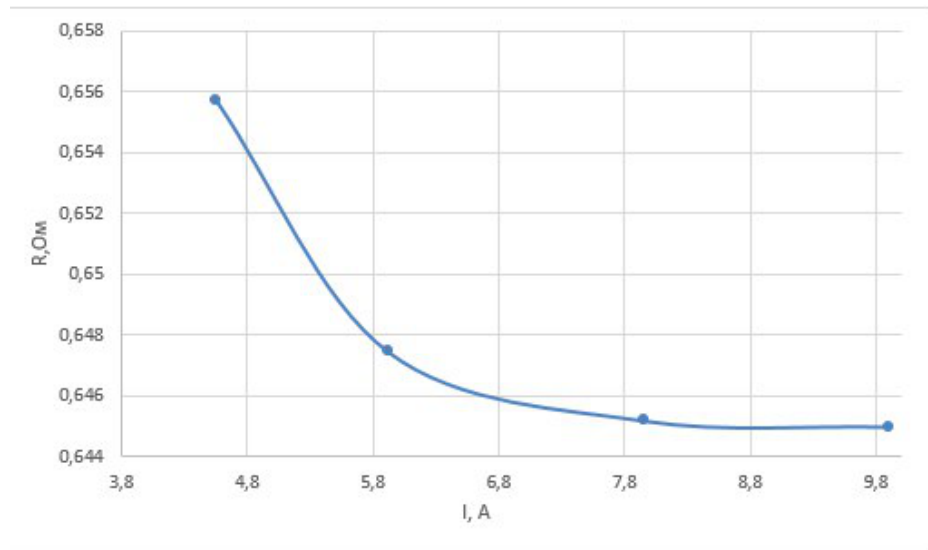


Рисунок 2.5 – Зміна опору електричного двигуна в залежності від сили струму

2.3 Умови проведення експериментальних досліджень

Швидкість обертання оправки навколо осі кільцевої робочої зони V_b складала 100, 200, 300 об/хв, обертання відбувалось проти стрілки годинника. Магнітна індукція B складала 0,175, 0,2125, 0,2375 Тл, а напруга U , яка є визначальною при зміні частоти обертання міні шпинделя з зразками навколо власної осі змінювалась в діапазоні від 3 до 22 В з кроком 1 В. Вимірювання

проводилось не менше дев'ятнадцяти разів для кожного значення, для проведення подальшого статистичного аналізу отриманих результатів. При кожному значенні швидкостей обертання навколо осі кільцевої контролювали величини:

- напругу на двигуні міні шпинделя (U),
- силу струму (I),
- швидкість обертання оправки навколо власної осі (ω).

Для розрахунку корисного моменту було використано наступні формули:

$$M_{x.x.} = \frac{U_{xx} \times I_{xx} - I_{xx}^2 \times r_{дв.}}{\omega}, \quad (2.2)$$

де U_{xx} - напруга (В), при холостому ході;

I_{xx} - сила току (А), при холостому ході;

$r_{дв.}$ - опір двигуна (Ом);

ω - швидкість оправки (рад.);

$$M_{еф} = M_{дв} - M_{x.x.}, \quad (2.3)$$

де $M_{кор}$ - ефективний момент;

$M_{дв}$ - робочий момент;

$M_{x.x.}$ - момент на холостому ході;

$$\omega = \frac{V_o \times 2 \times \pi}{60}, \quad (2.4)$$

де V_o - швидкість обертання оправки (об./хв.);

$$M_{дв} = \frac{U_{роб} \times I_{роб} - I_{роб}^2 \times r_{дв.}}{\omega}, \quad (2.5)$$

де $U_{роб}$ - робоча напруга (В);

$I_{роб}$ - робоча сила току (А);

$r_{дв.}$ - опір двигуна (Ом);

ω - швидкість оправки (рад.);

2.4 Пристрій для вимірювання тиску порошку на дослідний зразок при його обертанні навколо робочої зони типу «кільцева ванна»

Для безпосереднього контролю силових характеристик МАІ в робочій зоні кільцевого типу було спроектовано пристрій (рис 2.6), що складається з верхнього перехідника (3), що закріплюється у шпинделі верстату та базується по чотирьох отворах діаметром 7мм. Тензодатчик (2) на якому наклеєні тензорезистори кріпиться саморізальними гвинтами 6 з плоскими шайбами 7 до верхнього перехідника так, щоб забезпечити зазор приблизно 1 мм для раціональної роботи датчика. Тримач (1) за допомогою гвинтів 5 з шайбами 4 кріпиться до тензодатчика та призначений для закріплення дослідних зразків.

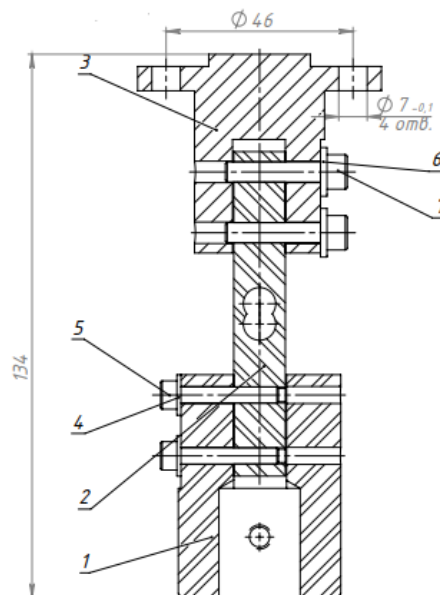


Рисунок 2.7 – Пристрій для вимірювання тиску порошку на дослідний зразок при його обертанні навколо робочої зони типу «кільцева ванна»

2.4.1 Принцип роботи пристрою вимірювання тиску порошку на дослідний зразок

Закріплений в тримачі дослідний зразок рухається навколо робочої зони, магнітний порошок чинить йому опір руху. При цьому тензодатчик працює на згин, АЦП HX 711 зчитує сигнал з тензодатчика в вольтах та перетворює інформацію в цифри з точністю 24 bit та передає значення на мікроконтролер ARDUINO Nano . Він перетворює значення в грами та через радіомодуль NRF24L01 сигнал поступає на інший радіомодуль на базі ARDUINO Nano (рис.2.8) що підключений до комп'ютера та виводить значення на екран.

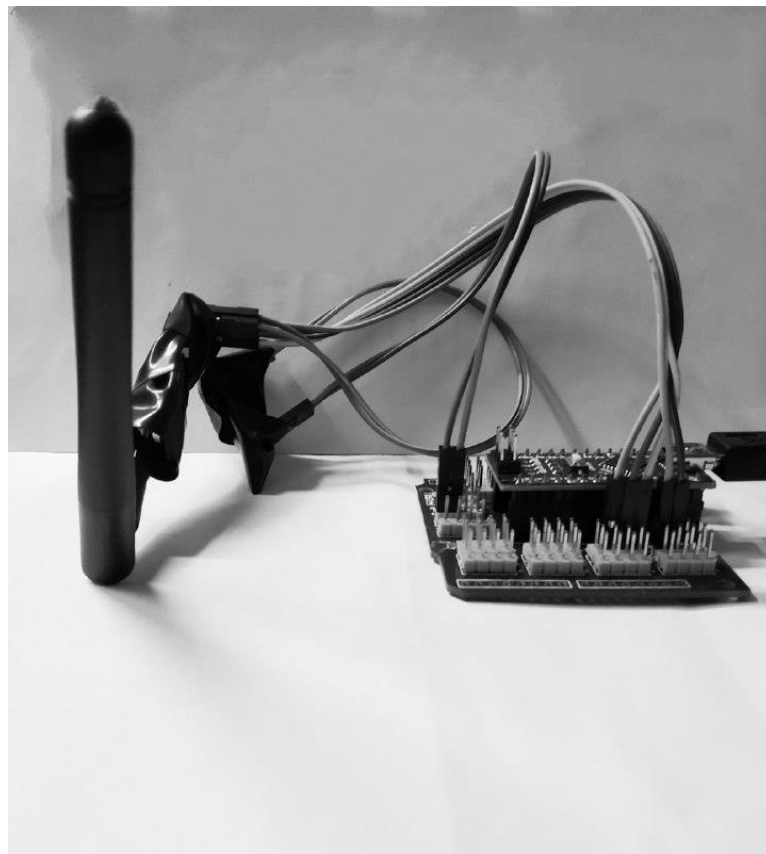


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд приймального радіомодулю NRF24L01

2.4.2 Перевірка тензодатчика на міцність за допомогою програмного забезпечення ANSYS

Вище було зазначено, що в спроектованому пристрої був використаний тензодатчик НХ711. Зазвичай, його використовуються в електронних вагах (кухонних, підлогових). Його характеристики зазначені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Характеристики тензодатчика НХ711

Похибка , %	Робоча температура, °C	Напруга живлення, В	Нелінійність, %	Максимальна допустима вага, кг
0.05	-10...+50	3...12	0,05	20

Тензодатчик виготовлений із алюмінієвого сплаву 2024-Т3 . Механічні характеристики та хімічний склад наведено у табл.2.2.

Таблиця 2.2 Механічні характеристики та хімічний склад алюмінієвого сплаву 2024-Т3

Механічні характеристики				Хімічний склад , %								
Твердість, НВ	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , МПа	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
50	450	320	19	до 0,5	до 0,5	0,3-0,9	до 0,1	до 0,15	90,9-94,7	3,8-4,9	1,2-1,8	до 0,25

Перед проведенням експерименту, потрібно впевнитись, що даний тензодатчик, з урахуванням геометрії пристосування, в робочих умовах працюватиме раціонально. Тому проводимо перевірку його на міцність

Для перевірки було використане програмне забезпечення ANSYS . Воно дозволяє вирішувати широкий спектр задач в різних областях (міцності, тепла, гідрогазодинаміки, електромагнетизму) Також програмне забезпечення може проводити міждисциплінарний аналіз, що включає всі чотири області. Програмне забезпечення може проводити оптимізацію конструкції на основі всіх перерахованих типів аналізу. Також дозволяє обмінюватись

розрахунковими моделями з основними CAE пакетами, а також забезпечує двосторонній зв'язок з багатьма CAD пакетами [18].

Був проведений статичний аналіз методом кінцевих елементів. 3D модель імпортована з Solidworks. Далі зв'язана з блоком статичного аналізу (рис 2.9).

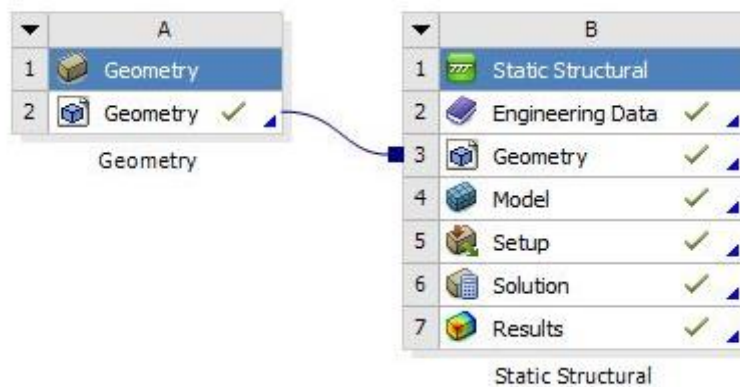
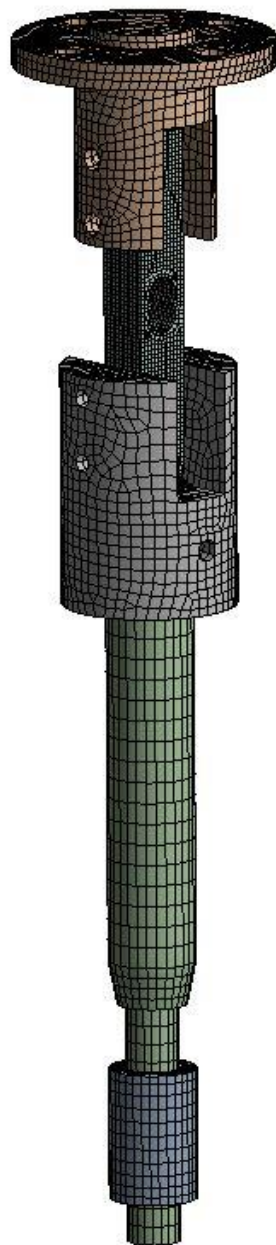


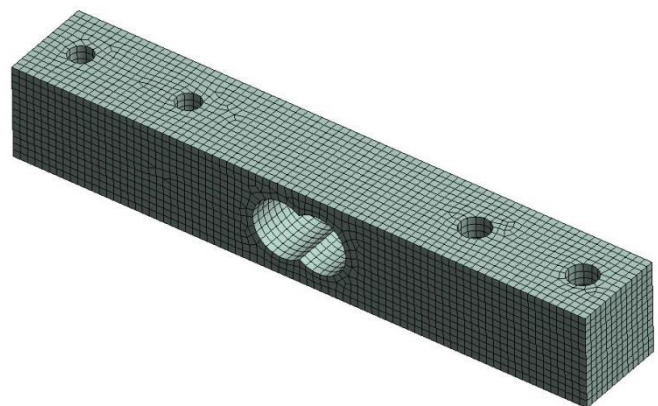
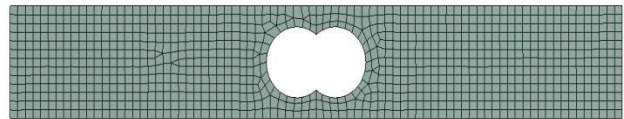
Рисунок 2.9 – Блоки програми ANSYS

Для точності розрахунку модель була спрощена. Кріплення моделі – жорстке, по фланцевих отворах. Тип контакту - зв'язаний. Тип сітки – переважно гексагональна. В місцях де гексагональну сітку побудувати неможливо через форму поверхні, утворено тетраїдальну сітку (рис. 2.10 а).

Мінімальний розмір гексаедра - 3мм , максимальний -5мм. Кількість вузлів – 121 130 , кількість елементів – 32 012 . Для більш точного аналізу на тензодатчику окремо , була використана сітка з максимальним розміром гексаедра – 1мм (рис.2.10 б)



а)



б)

Рисунок 2.10 – а) Загальна сітка пристосування , б) сітки тензодатчика з локальними налаштуваннями.

Після побудови сітки було проведено аналіз на міцність , що показав максимальне значення напружень . При згині на розтягнутих волокнах (рис. 2.11) присутнє з'єднання зв'язане по вузлах ,тобто тертя відсутнє .

B: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 28.11.2018 20:22

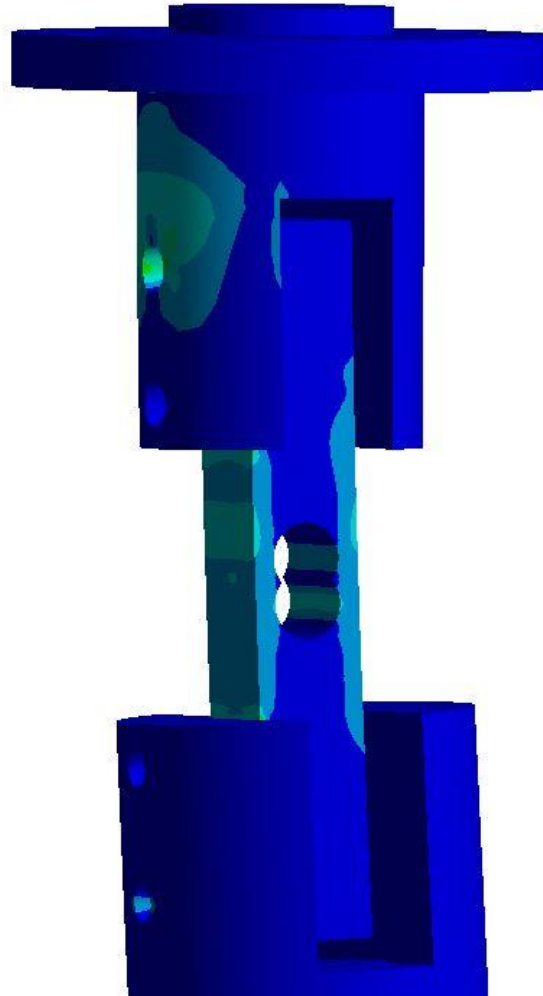
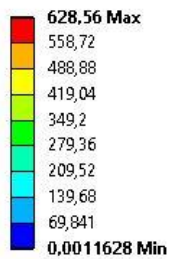
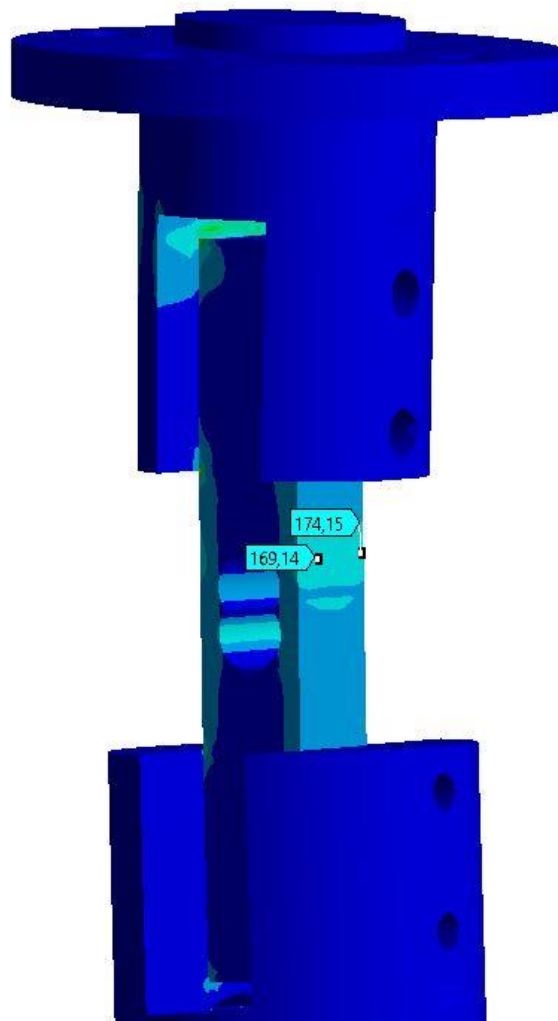
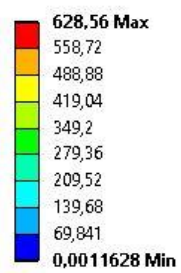


Рисунок 2.11 – Аналіз пристосування на міцність , вигляд з сторони розтягнутих волокон

Відповідно у цій зоні підвищуються напруження, тому робимо висновки по напруженнях на стиснених волокнах , які насправді будуть аналогічні напруженням при розтягу . Таке рішення прийнято через те, що аналіз з тертям займає багато часу , та збільшується його похибка.

На рис.2.12 показані максимальні значення напружень на стиснутих волокнах , що рівні 174,15 МПа ,вони не перевищують допустимих напружень (табл 2.2) , тому робимо висновок , що даний тензодатчик підходить для даного пристосування та умов експлуатації.

B: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 28.11.2018 20:22



B: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 28.11.2018 20:20

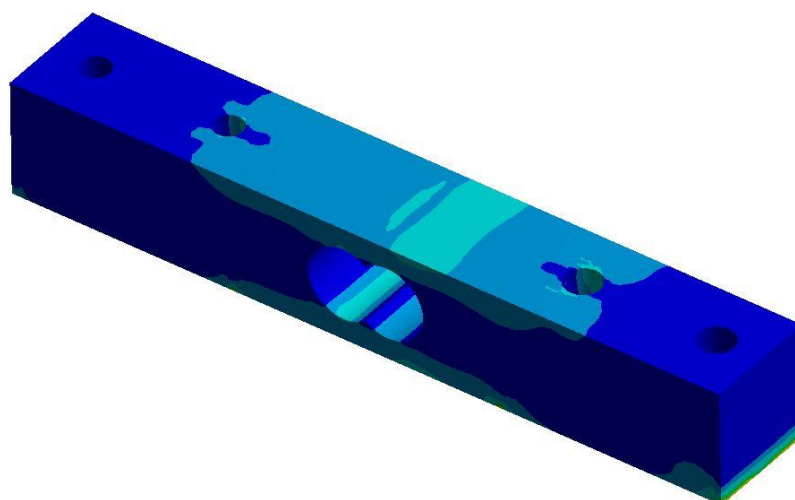
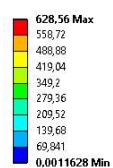


Рисунок 2.12 – Максимальні значення напружень на стиснутих волокнах

Також було отримані значення переміщень пристосування (рис.2.13) , максимальні переміщення виконує дослідний зразок – 6,13179 мм , тензодатчик виконує переміщення в діапазоні 0-0,68199мм , фланець – 0мм.

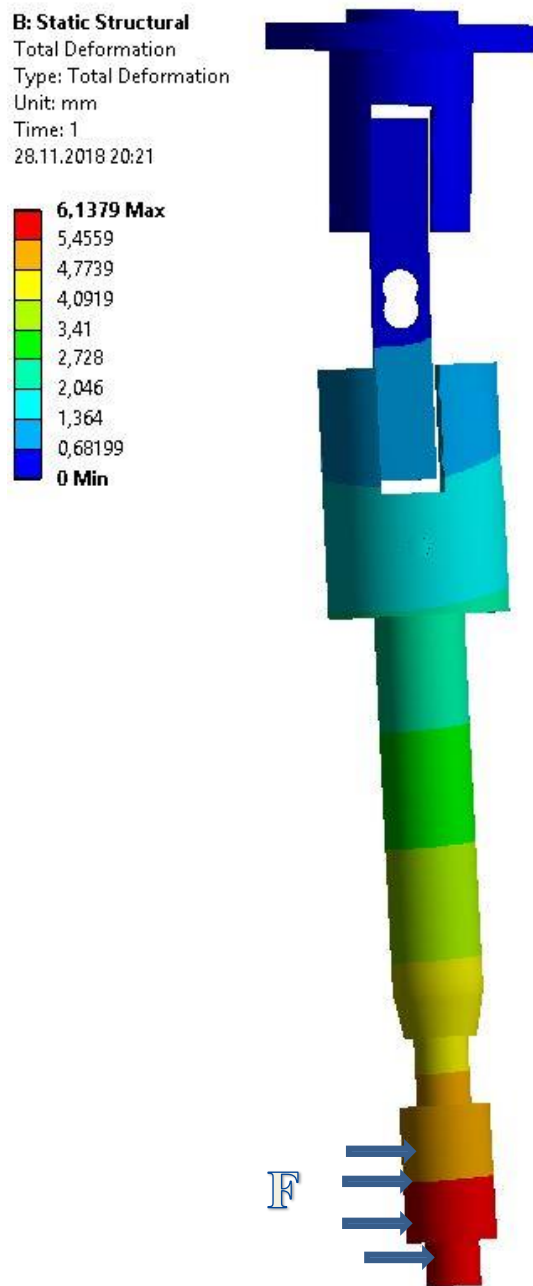


Рисунок 2.13 – Аналіз переміщення пристосування

2.5 Магнітно-абразивні матеріали та зразки що використовувались при МАО

Експериментальні дослідження виконували при МАО деталей виготовлених з титану та сталі 40Х13 у формі валу зовнішнім діаметром 16мм, внутрішнім діаметром 10 мм та висотою 30мм (рис.2.6). Перший зразок із магнітної сталі 40Х13, інший із сплаву титану ВТ-8, який є парамагнітним матеріалом.

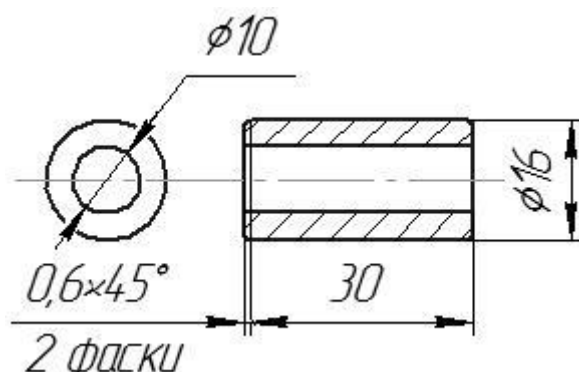


Рисунок 2.6 – Ескіз дослідного зразку зі сталі 40Х13 та титанового сплаву ВТ-8

Магнітний і немагнітний зразок використано для того, щоб визначити на скільки сили магнітного поля впливають на силові характеристики при взаємодії МАІ з оброблюваним поверхнями. Встановлено, що при обробці немагнітного зразку МАІ витискається в нижню частину робочої зони і за її межі. Відновлення властивостей МАІ виконували шляхом використання немагнітного відновлювального стержневого елемента МАІ [12, 17]. Для формування МАІ були використані порошки осколкової форми ПОЛІМАМ-Т з розміром фракції 200/100 мкм, 400/315 мкм.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Визначення моменту на шпинделі двигуна при обертанні дослідного зразка у вільній від МАІ робочій зоні типу «кільцева ванна»

Тарування пристосувань виконувалось на установці з вільною від МАІ робочою зоною кільцевого типу. Тарування проводилось на двох типах дослідних зразків, перші з магнітної сталі 40Х13, другі з парамагнітного титанового сплаву ВТ-8. Дослідні зразки розташовувались паралельно осі кільцевої ванни та виконували навколо неї обертання при магнітній індукції $B=0,175; 0,2125; 0,2375$ Тл. Обертання зразка навколо власної осі виконувалось за допомогою двигуна мінішпинделя (рис.2.2) на який подавали постійну напругу (U) від 3 до 22 В з кроком 1В на кожній швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=100, 200, 300$ об/хв. Вимірювання сили струму (I) та реальної швидкості обертання дослідного зразка навколо власної осі виконували для кожного значення напруги та в подальшому за формулою 2.2 визначали значення моменту на холостому ході двигуна (M_{xx}). Значення M_{xx} використовувались для наступного етапу розрахунку ефективного моменту M_{ef} .

Визначення моменту на холостому ході при різних швидкостях обертання дослідних зразків

Для швидкостей обертання деталі навколо осі кільцевої ванни 100, 200, 300 об/хв з магнітної сталі 40Х13 були отримані результати, які представлені у вигляді залежностей на діаграмах (рис. 3.1, 3.2, 3.3). З них було визначено поліноміальні залежності при різних значеннях магнітної індукції (B).

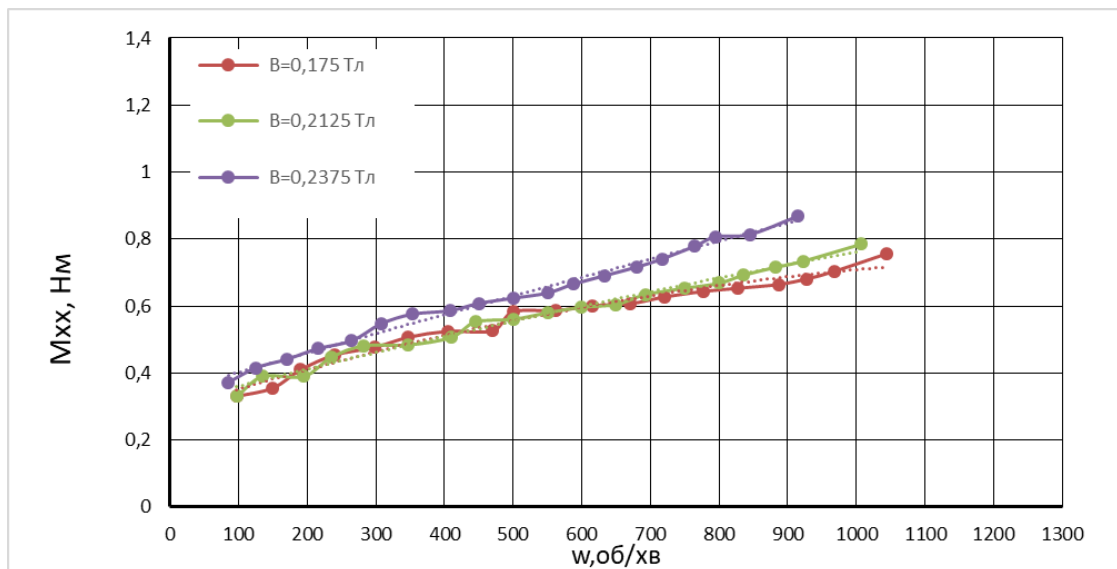


Рисунок 3.1 – Момент холостого ходу на валу шпинделя при оброблені зразку зі 40X13 $V=100$ об/хв

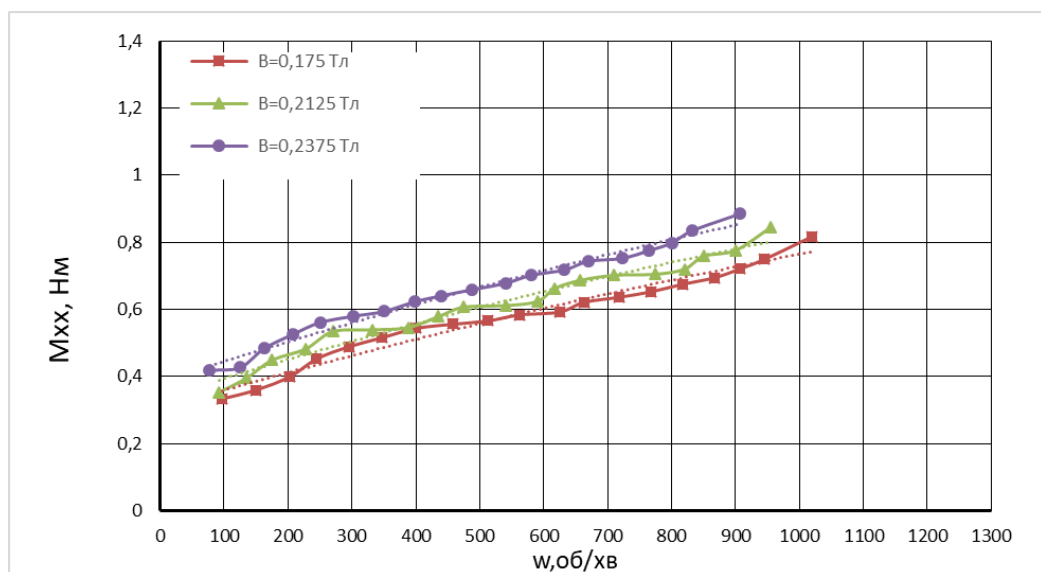


Рисунок 3.2 – Момент холостого ходу на валу шпинделя при оброблені зразку зі 40X13 $V=200$ об/хв

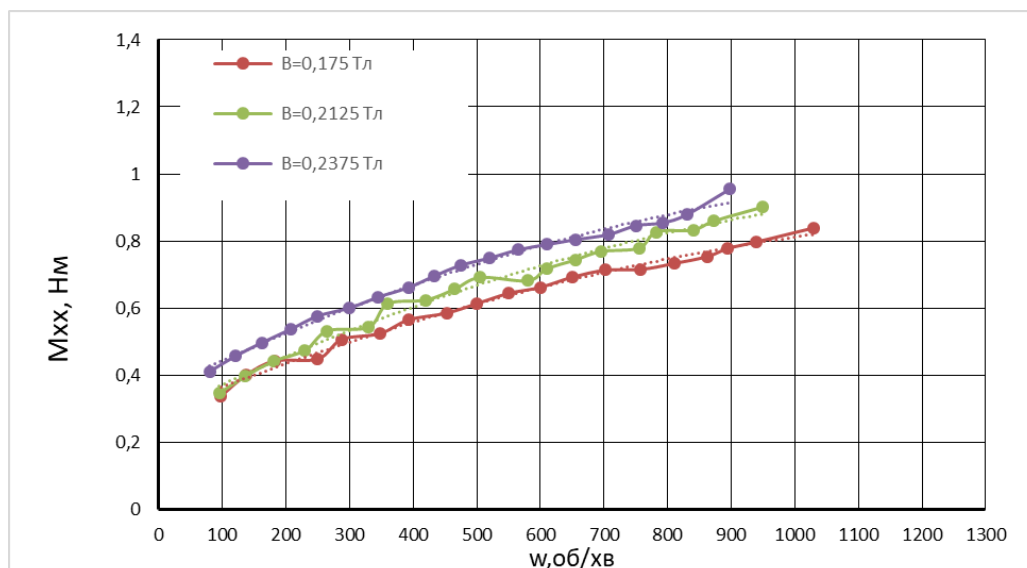


Рисунок 3.3 – Момент холостого ходу на валу шпинделя при обробленні зразку зі 40X13 $V=300$ об/хв.

Показано, що значення магнітної індукції B не сильно впливає на величину моменту на холостому ході. Тому отримані результати піддавалися усередненню і була визначена єдина поліноміальна залежність для подальших розрахунків. Отримані усередненні поліноміальні залежності представлено у вигляді $M_{xx}=a+k \cdot \omega$. Отримані значення коефіцієнтів наведено в таблиці 3.1 .

Таблиця 3.1 Усереднені значення моментів на холостому ході сталевго зразка для швидкостей $V=100, 200, 300$ об/хв

Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни V , об/хв	Значення лінійних коефіцієнтів	
	a	ω
100	0,3566	0,0004
200	0,3659	0,0005
300	0,3769	0,0005

На рис 3.4 показано діаграму моментів холостого ходу на валу шпинделя при обробленні зразків зі 40X13 при різних значеннях швидкості обертання зразка навколо осі кільцевого робочого зазору вільного від МАІ.

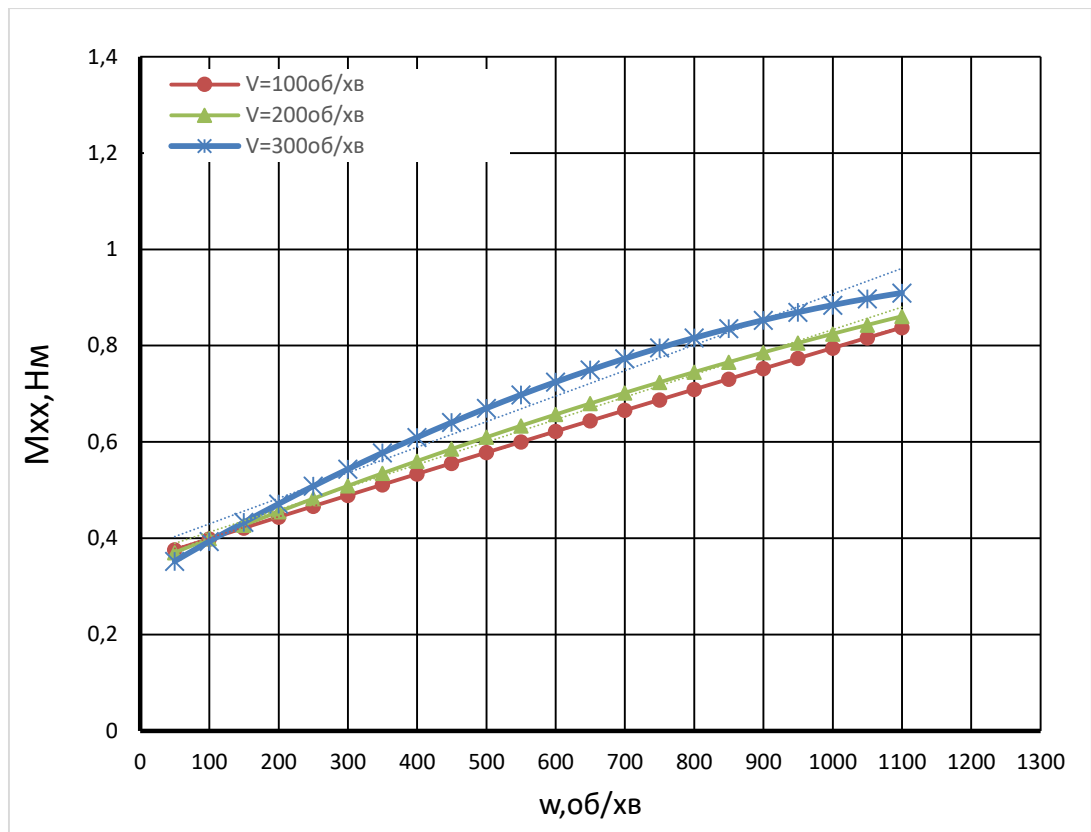


Рисунок 3.4 – Усереднений момент холостого ходу на валу шпинделя при обробленні зразку зі 40X13

Аналогічні дослідження та розрахунки виконані при обробленні немагнітних зразків виготовлених з титанового сплаву ВТ-8. Результати наведені в таблиці 3.2 та на рис. 3.5.

Таблиця 3.2 Усереднені значення моментів на холостому ході титанового зразка для швидкостей $V=100, 200, 300$ об/хв

Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни $V, об/хв$	Значення лінійних коефіцієнтів	
	a	ω
100	0,2985	0,0003
200	0,3295	0,0004
300	0,384	0,0004

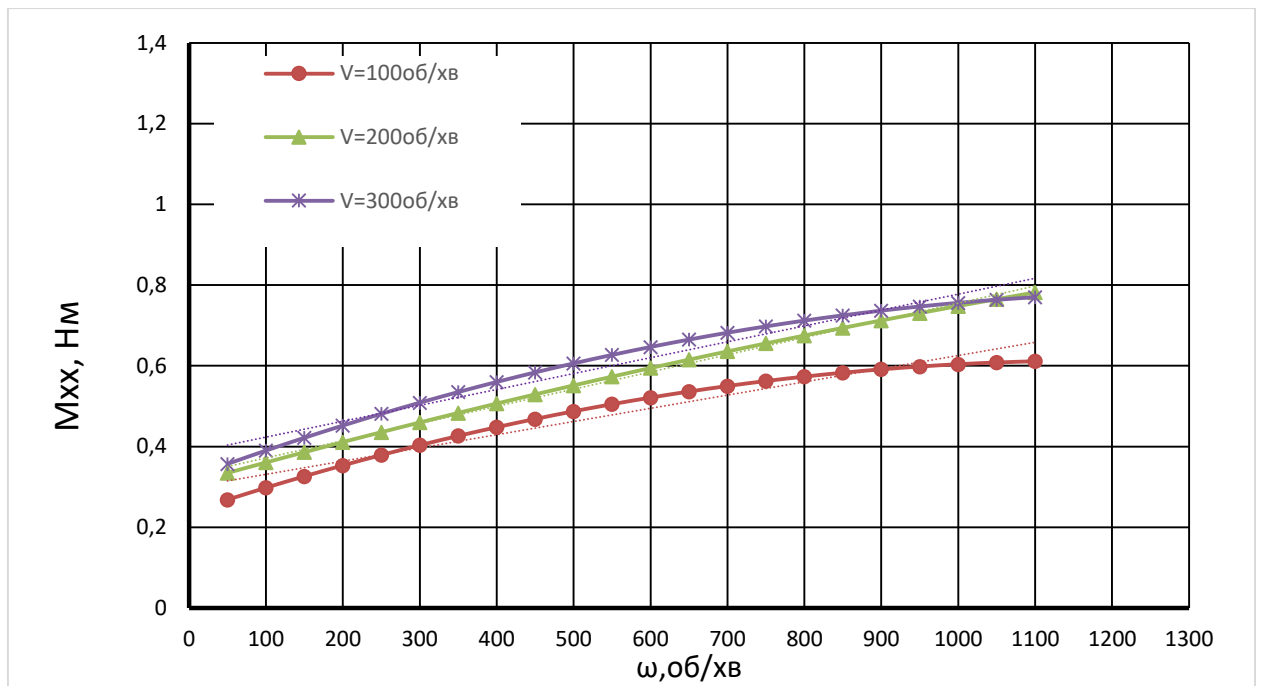


Рисунок 3.5 – Усереднений момент холостого ходу на валу шпинделя при обробленні зразків зі сплаву ВТ-8

На рисунку 3.5 показано що при збільшенні швидкості обертання зразків навколо осі кільцевого робочого зазору M_{xx} зростає при збільшенні швидкості обертання зразків навколо власної осі, з відцентровими силами що діють в системі.

3.2 Визначення ефективного моменту на шпинделі двигуна при МАО в робочій зоні кільцевого типу

Робочу зону кільцевого типу об'ємом 525840 мм^3 було заповнено МАП типу ПОЛІМАМ-Т зернистістю 200/100 мкм та 400/315 мкм з насипною щільністю $0,00304 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$. Коефіцієнт заповнення сухим порошком дорівнює одиниці.

Виконували вимірювання сили струму (I) та обертання дослідного зразка навколо своєї осі (ω). Дослідження виконували на зразках виготовлених зі сталі 40Х13 та титанового сплаву ВТ-8 для швидкостей їх обертання навколо

кільцевої ванни $V=100, 200, 300$ об/хв, величина магнітної індукції $B=0,175; 0,2125; 0,2325$ Тл для кожного значення (U), що подавалась на двигун мінішпинделя в діапазоні від 3 до 22 В з кроком 1 В. Експериментальні дослідження виконували з використанням ВСЕ для відновлення форми МАІ та без.

За отриманими експериментальними даними, користуючись формулами (2.4-2.5), було визначено зусилля на валу шпинделя для кожного зразку, яке в подальшому використовувалось для розрахунку ефективного моменту ($M_{\text{еф}}$).

3.2.1 Визначення ефективного моменту на шпинделі двигуна при МАО зразків зі сталі 40Х13

Результати визначення ефективного моменту на валу двигуна при обробленні зразків зі сталі 40Х13 магнітно-абразивним інструментом сформованим з порошку ПОЛІМАМ-Т 200/100 мкм представлено на рис. 3.6. ВСЕ використовували діаметром 10 мм виготовленим з немагнітного матеріалу, кут базування відносно площини робочої зони 45° . На рис. 3.6 показано що при використанні ВСЕ величина моменту зростає при збільшенні швидкості обертання зразків навколо власної осі.

Отримані результати апроксимовані квадратичними поліномами виду

$$Y = a_1 \cdot X^2 + a_2 \cdot X + a_3$$

де a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти поліному ,

Y - величина корисного моменту

X - величина швидкості обертання зразків навколо власної осі .

Дані розрахункові значення використовуються для визначення величини ефективного моменту за формулою 2.3.

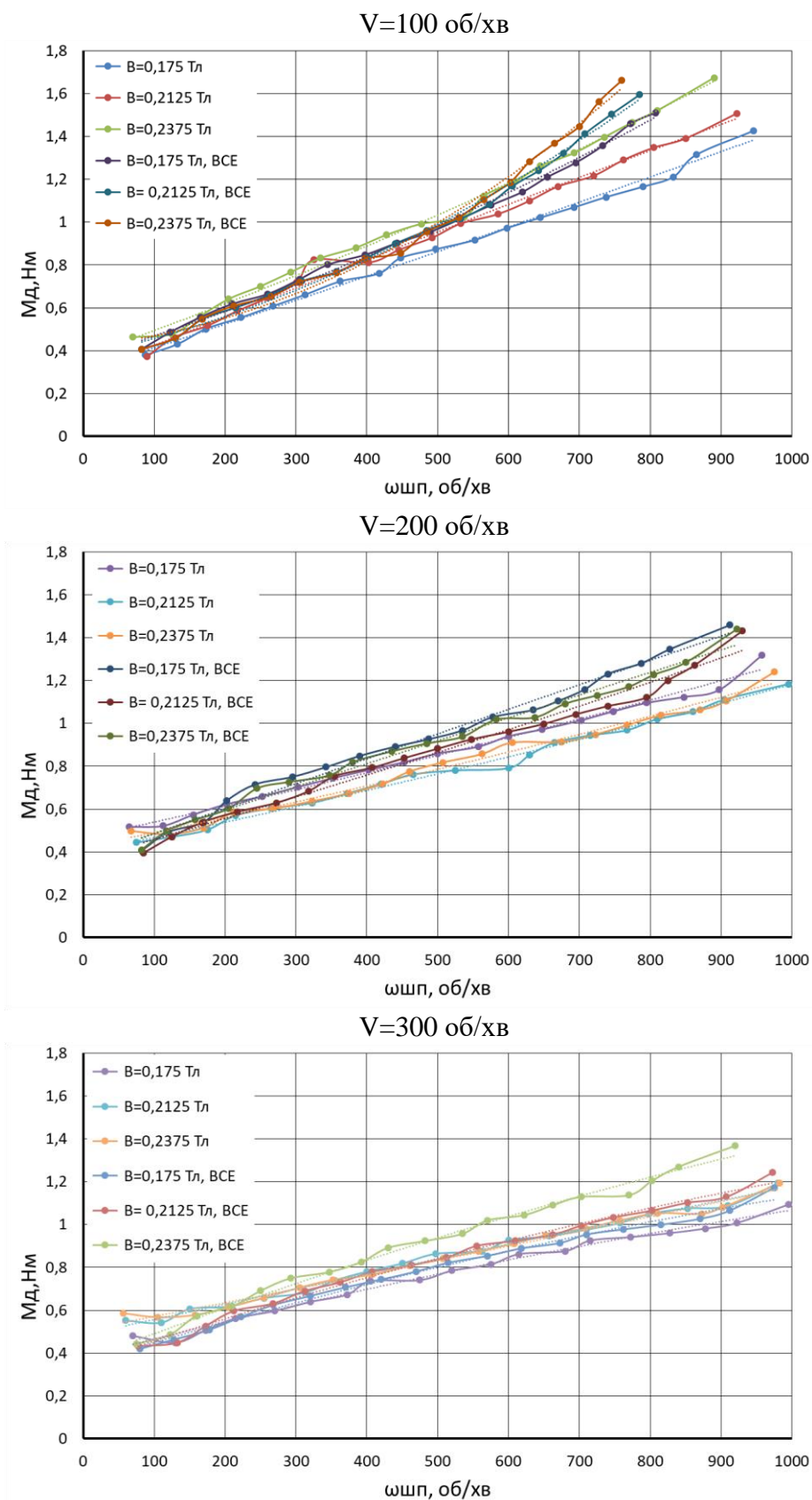


Рисунок 3.6 – Корисний момент на валу шпинделя при обробленні зразка зі сталі 40X13

Швидкість обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни

$$V=100 \text{ об/хв}$$

Експериментальні дослідження виконано для усіх зазначених вище значень електромагнітної індукції (В). Спочатку досліджено зміну $M_{\text{еф}}$ без використання немагнітного ВСЕ, а потім з ВСЕ.

На рис.3.7 показано, що при швидкості обертання зразка навколо робочої зони типу «кільцева ванна» $V=100$ об/хв при збільшенні магнітної індукції (В) величина ефективного моменту $M_{\text{еф}}$ зростає. Це пояснюється тим, що чим більше значення магнітної індукції (В), тим щільніше порошок розташовується у робочій зоні. Ефективний момент фактично визначає сили тертя, що виникає між оброблюваною деталлю та МАІ [3, 21]. Тобто чим більша сила тертя, тим ефективний момент ($M_{\text{еф}}$) більший. Пунктирною лінією на діаграмі представлені результати оброблення з немагнітним ВСЕ. Установлено, що при наявності немагнітного ВСЕ, коли швидкість обертання навколо своєї осі перевищує 600 об/хв, ефективний момент стрімко росте. З цього зроблено висновки, що оброблення сталі 40Х13 при швидкості обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни найбільш ефективно на високих оборотах зразка навколо власної осі (ω).

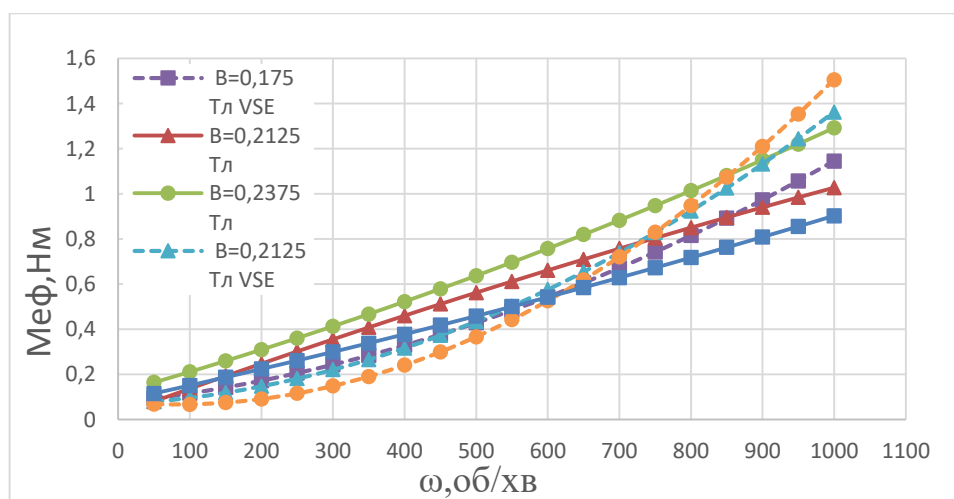


Рисунок 3.7 – Ефективний момент при швидкості обертання сталевих зразків навколо кільцевої ванни $V=100$ об/хв

Швидкість обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни

$$V=200 \text{ об/хв}$$

За аналогічних умов досліджень зміну величини ефективного моменту при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв. Результати представлені на діаграмі наведеній рис. 3.8.

В даному випадку магнітна індукція B майже не впливає на величину ефективного моменту. Це пояснюється тим, що тертя, яке виникає між деталлю та МАІ значно зменшилось в порівнянні з попереднім експериментом при швидкості 100 об/хв [25].

Але на діаграмах показано, що із збільшенням обертання зразка навколо своєї осі, ефективний момент плавно зростає, тому можемо зробити висновок, що оброблення проходить стабільно, а отже процес ми можемо контролювати в діапазоні $\omega=50\dots1000$ об/хв.

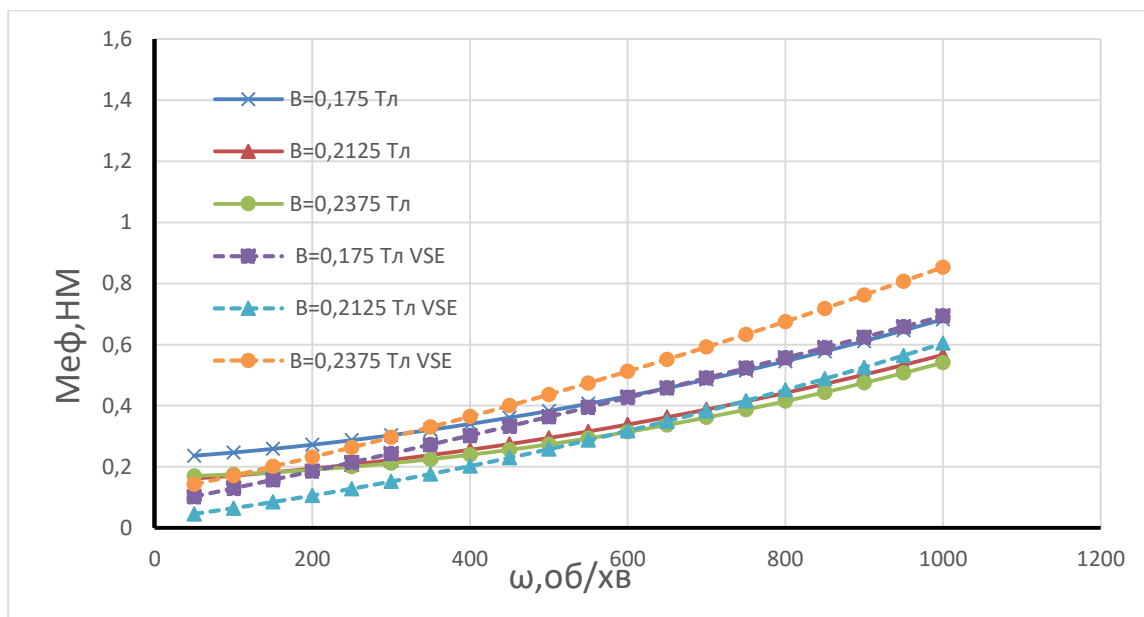


Рисунок 3.8 - Ефективний момент при швидкості обертання сталевих зразків навколо кільцевої ванни $V=200$ об/хв

Немагнітний VSE в цьому ж експерименті впливає мало, але все ж таки збільшує ефективність оброблення.

Швидкість обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни

$$V=300 \text{ об/хв}$$

При швидкості обертання деталі навколо осі кільцевої ванни $V=300$ об/хв установлено зниження ефективного моменту при значеннях швидкості обертання зразка навколо власної осі понад 600 об/хв. При обробленні без немагнітного ВСЕ максимальне значення ефективного моменту в діапазоні швидкостей обертання зразка навколо власної осі від 50 до 1000 об/хв при магнітній індукції $B=0,2375$ Тл становить всього 0,24 Нм.

При використанні немагнітного ВСЕ, що відновлює властивості МАІ у робочій зоні ефективний момент зростає до 0,64 Нм при значенні магнітної індукції $B=0,2375$ Тл.

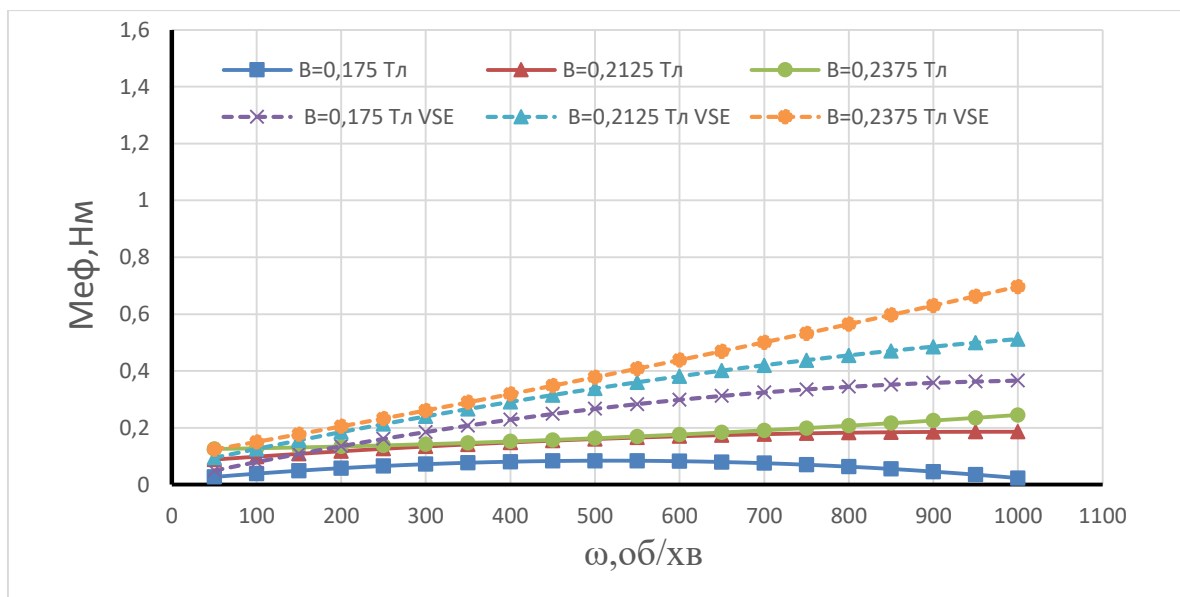


Рисунок 3.9 - Ефективний момент при швидкості обертання сталевих зразків навколо кільцевої ванни $V=300$ об/хв

При обробленні дослідних зразків із сталі 40Х13 з використанням немагнітного ВСЕ при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни понад 200 об/хв спостерігається ріст ефективного моменту в 1,5-2 рази. Тому для даних умов доцільно використовувати ВСЕ.

3.2.2 Визначення ефективного моменту на шпинделі двигуна при МАО зразків з титанового сплаву ВТ-8

Швидкість обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни

$$V=100 \text{ об/хв}$$

Для даної швидкості $V=100$ об/хв, ефективний момент при обробці без немагнітного ВСЕ максимально досягає свого значення при магнітній індукції $B=0,2375$ Тл та швидкості обертання навколо своєї осі (ω) понад 950 об/хв. При Магнітній індукції $B=0,18$ Тл та швидкості понад 800 об/хв ефективний момент починає зменшуватись, ефективність оброблювання знижується. Це зв'язано з тим, що титан – парамагнітний матеріал, порошок із робочої зони, витісняється вниз, ефективність обробки знижується і процес стає слабо контрольованим.

На рис.3.10 показано, що при обробленні титанового зразка з немагнітним ВСЕ, ефективний момент збільшився в 1,63 рази. Тому для наступних експериментів було прийняте рішення виконувати оброблення з немагнітним ВСЕ для відновлення властивостей МАІ.

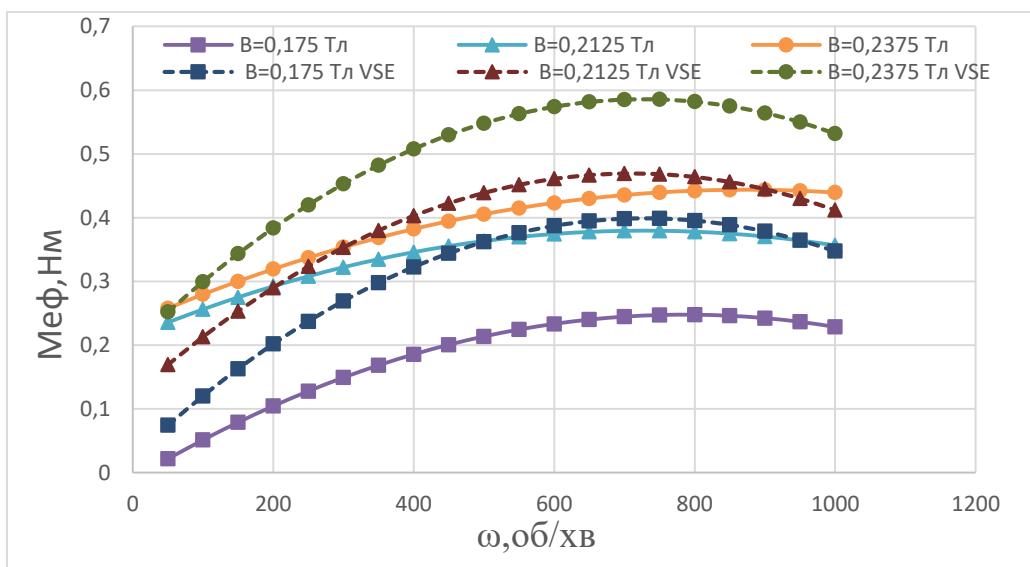


Рисунок 3.10 - Ефективний момент при швидкості обертання титанового зразка навколо кільцевої ванни $V=100$ об/хв

Швидкість обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни

$$V=200 \text{ об/хв}$$

На діаграмі (рис 3.11) при обробленні з немагнітним ВСЕ показано , що значення ефективного моменту при обертах зразка навколо власної осі понад 800об/хв коливаються від 0,42 до 0,45 Нм. Тому робимо висновок, що ефективність обробки титанового зразка слабо залежить від величини магнітної індукції (В). Стабільна робота спостерігається в області від 700 до 900 об/хв.

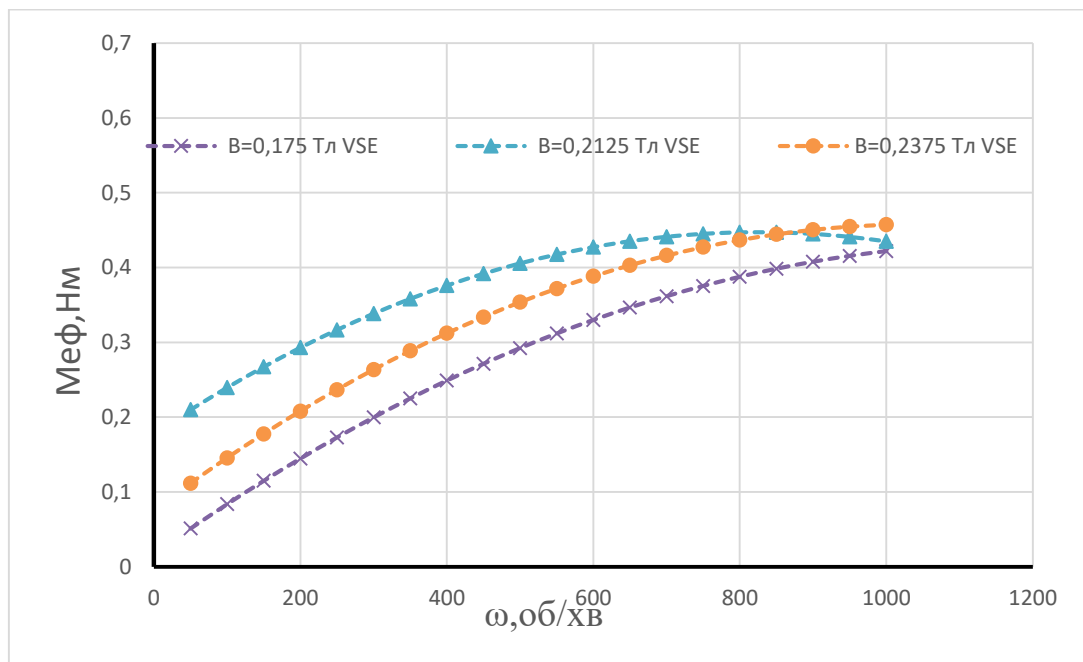


Рисунок 3.11 – Ефективний моментів при швидкості обертання титанового зразка навколо кільцевої ванни $V=200\text{об/хв}$

Установлено , що при магнітній індукції $B=0,2375 \text{ Тл}$, в порівнянні з іншими експериментами величина ефективного моменту різко впала. Це свідчить про те, що при обробленні при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=200\text{об/хв}$ та електромагнітній індукції $B=0,2375 \text{ Тл}$ механізм контакту частинок МАІ з поверхнею, що оброблюється змінюється .

Це може бути зв'язано з ефектами псевдозрідження, що відзначено в роботі [3] або з дією пондеромоторних сил. Тобто при взаємодії порошку (1) з деталлю (2), через яку проходять лінії магнітного поля (3), утворюються квазістабільні мікроконтури з частинок порошку, в яких генерується струм, який в свою чергу формує локальне мікрополе і може або знижувати, або збільшувати загальну величину магнітного поля в робочих зазорах. В нашому випадку, ми маємо зниження загальної величини сил магнітного поля (рис.3.12).

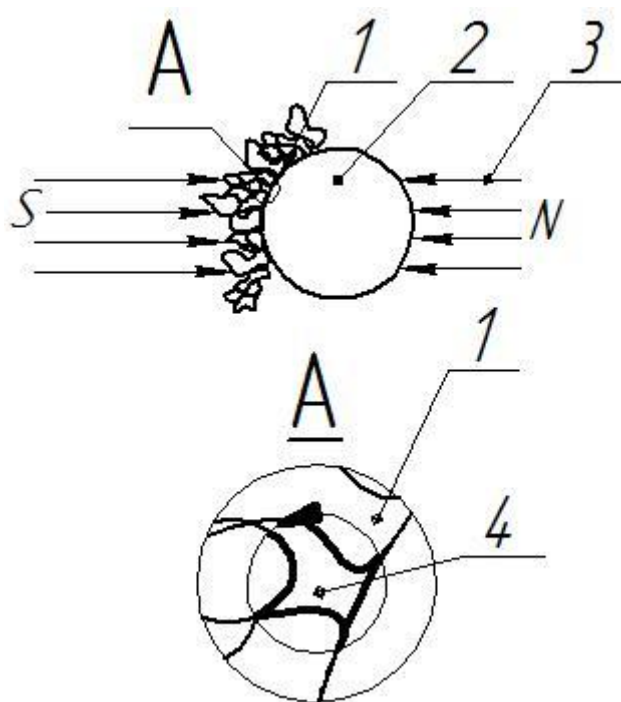


Рисунок 3.12 – Дія пондеромоторних сил в МАІ

Швидкість обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни

$$V=300 \text{ об/хв}$$

При магнітній індукції $B=0,2375$ Тл величина ефективного моменту стрімко зростає, що показано на діаграмі (рис.3.13). Вагома розбіжність спостерігається при швидкості обертання титанового зразка навколо власної осі понад 200 об/хв. Можемо припустити, що при обробленні як і в минулому

випадку має місце дія пондеромоторних сил. Але, на відміну від експерименту, де швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни (V) становила 200 об/хв, струм, що виник у контурі підсилив дію магнітного поля та позитивно вплинув на ефективність оброблення.

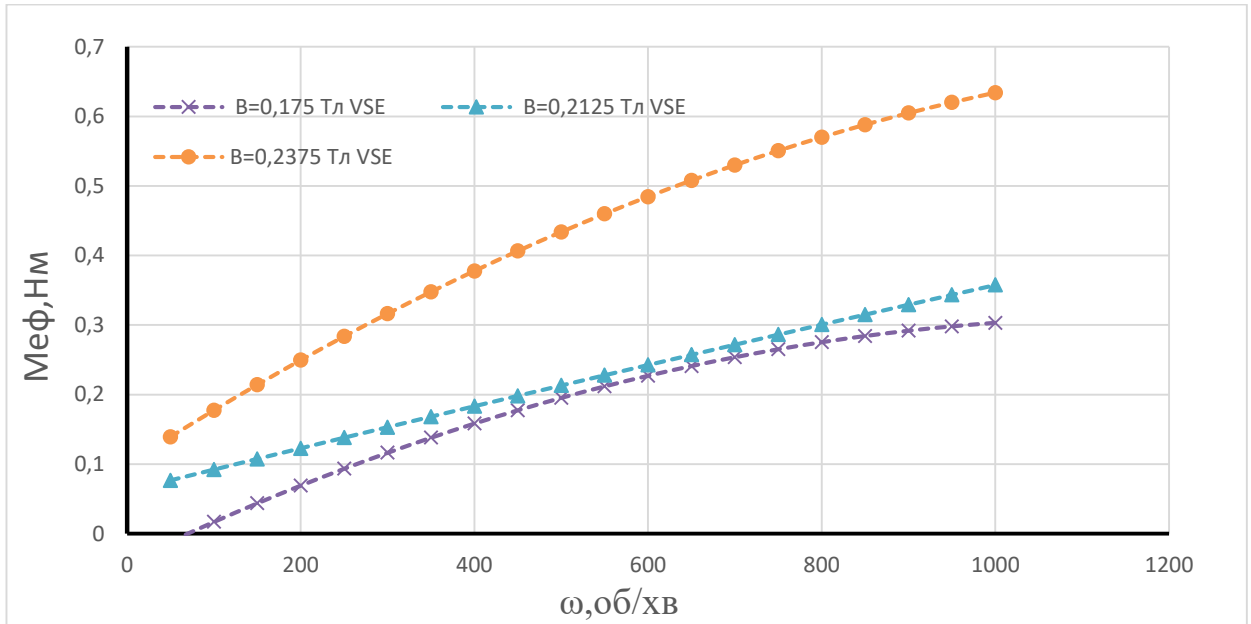
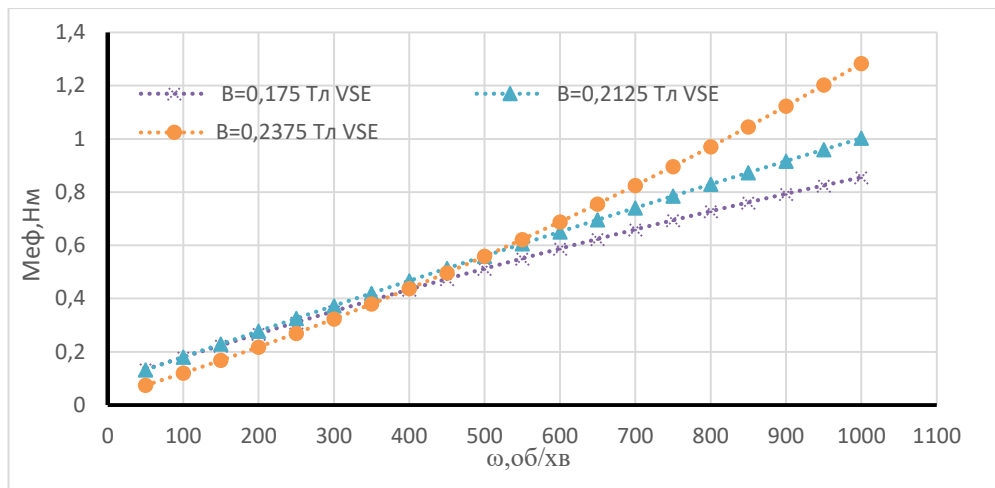


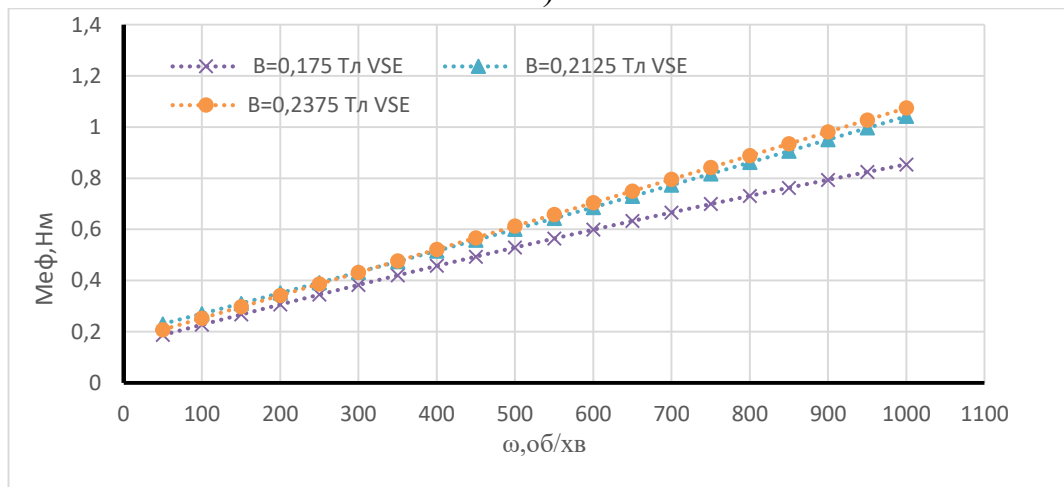
Рисунок 3.13 – Ефективний момент при швидкості обертання титанового зразка навколо кільцевої ванни $V=300$ об/хв

Аналогічні експерименти були проведені на цих двох зразках при використанні в якості МАІ порошку ПОЛІМАМ-Т з зернистістю 400/315 мкм.

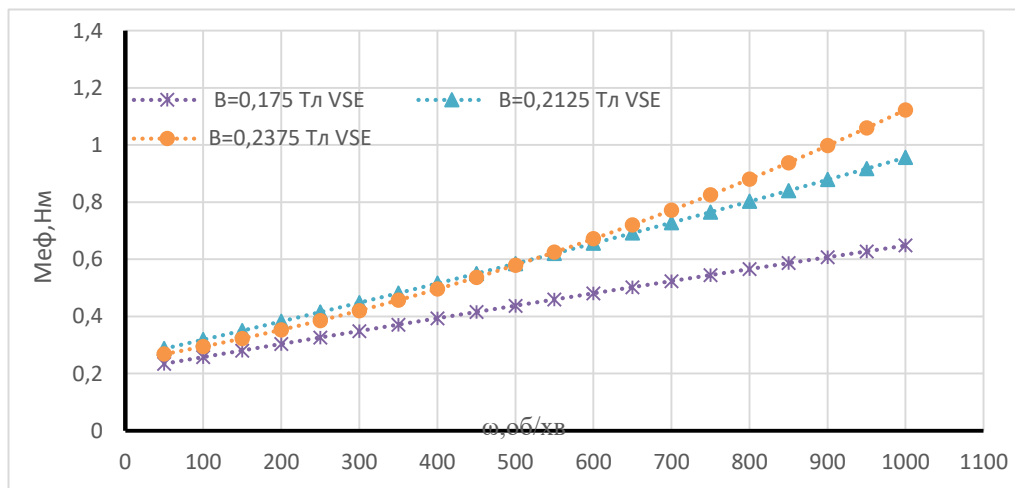
Результати при обробленні сталевих зразків показані на рис. 3.15. При всіх значеннях магнітної індукції (B) при різних швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни (V) ефективний момент веде себе подібно до оброблення, де в якості МАІ використаний ПОЛІМАМ-Т 200/100 мкм.



а)



б)



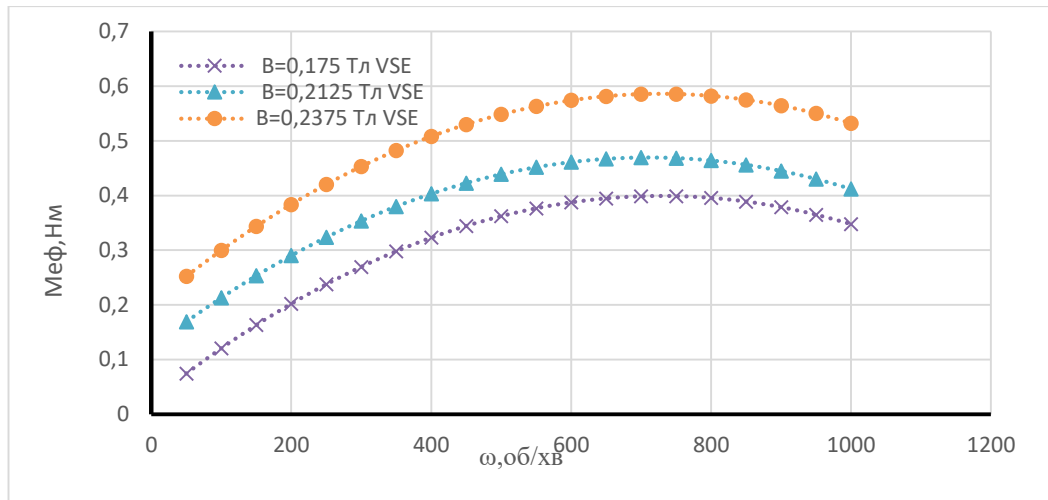
в)

Рисунок 3.15 – Ефективний момент на шпинделі двигуна при МАО сталевго зразка при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни (V):

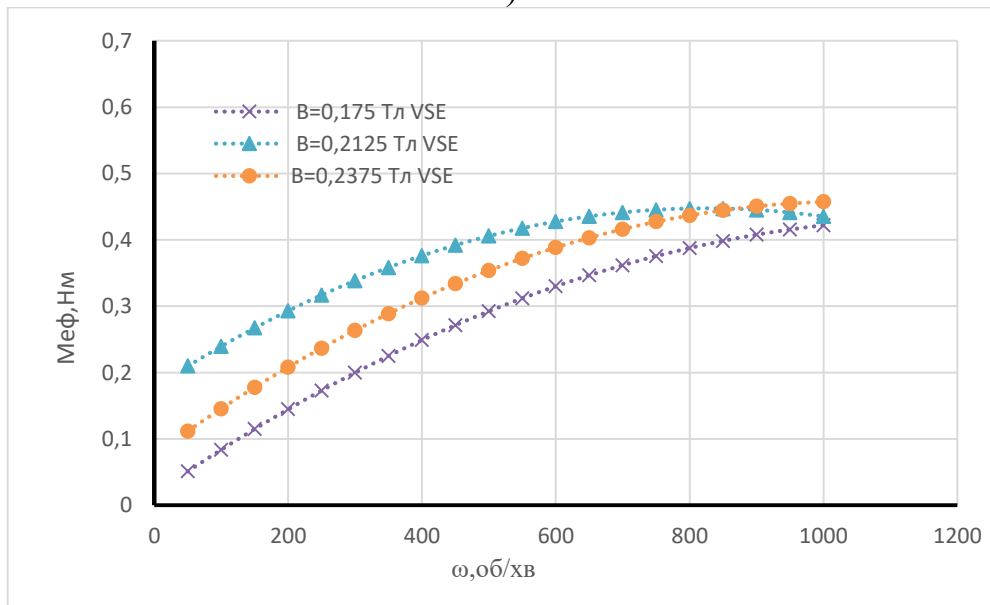
а) 100 об/хв б) 200 об/хв в) 300 об/хв

При обробленні зразка з парамагнітного титанового сплаву ВТ-8, на швидкостях обертання його навколо осі кільцевої ванни $V=100; 200; 300$ об/хв виведені наступні залежності (рис. 3.16).

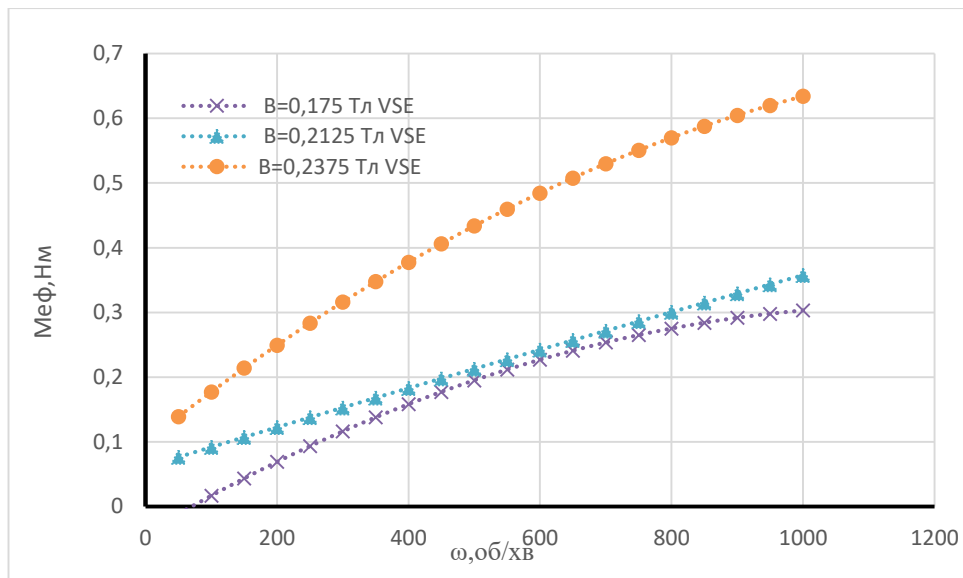
Підтверджено ,що при швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв ефективний момент поводить себе аналогічно , як у випадку оброблення з використанням МАІ Полімам -Т 200/100 .



а)



б)



в)

Рисунок 3.16 – Ефективний момент на валу двигуна при МАО титанового зразка при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни (V): а) 100 об/хв б) 200 об/хв в) 300 об/хв

На рис. 3.16 б показано, як змінюється $M_{\text{еф}}$ при магнітній індукції $B=0,2125 \text{ Тл}$ і при $B=0,2375 \text{ Тл}$. На діаграмі 3.16 в спостерігається різкий стрибок ефективного моменту при магнітній індукції $B=0,2375 \text{ Тл}$. На підставі цих та попередніх дослідів при швидкості обертання зразка з титанового сплаву ВТ-8 $V=200 \text{ об/хв}$ і магнітній індукції $B=0,2125$, можемо зробити висновки, що в механізмі контакту частинок МАІ з зразком має місце дія пондеромоторних сил або ефект псевдозрідження. При швидкості обертання зразка навколо робочої зони $V=300 \text{ об/хв}$ спостерігається дія пондеромоторних сил, яка підсилює дію магнітного поля. Тому поведінка ефективного моменту не залежить від типу МАІ.

3.3 Залежність силових характеристик МАІ від швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни

Аналізуючи діаграми зроблено висновок, що найбільший вплив на зміну силових характеристик МАІ має швидкість обертання навколо кільцевої ванни. Тому прийнято рішення побудувати поверхні, які б характеризували зміну ефективного моменту в залежності від величини швидкості V . Для досягнення мети використали Surfer. Це тривимірна програма креслення поверхні карт, яка виконується в середовищі Microsoft Windows. Вона швидко і легко перетворює дані в контур, поверхню, каркас, вектор, зображення, заштриховану область [19].

В подальшому аналіз використали як рекомендації щодо обробки магнітних та парамагнітних матеріалів.

3.3.1 Залежність силових характеристик МАІ від швидкості обертання зразка з парамагнітного титанового сплаву ВТ-8 навколо осі кільцевої ванни

Магнітна індукція $B=0,175\text{Тл}$

На рис. 3.17 показано максимум ефективного моменту при швидкості навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв та при швидкості обертання навколо власної осі $\omega=1000$ об/хв. Ріст величини ефективного моменту спостерігається на ділянці від $V=100$ об/хв до 200 об/хв, при V понад 200 об/хв величина ефективного моменту знижується, що означає що в даному випадку має місце ефект псевдозрідження.

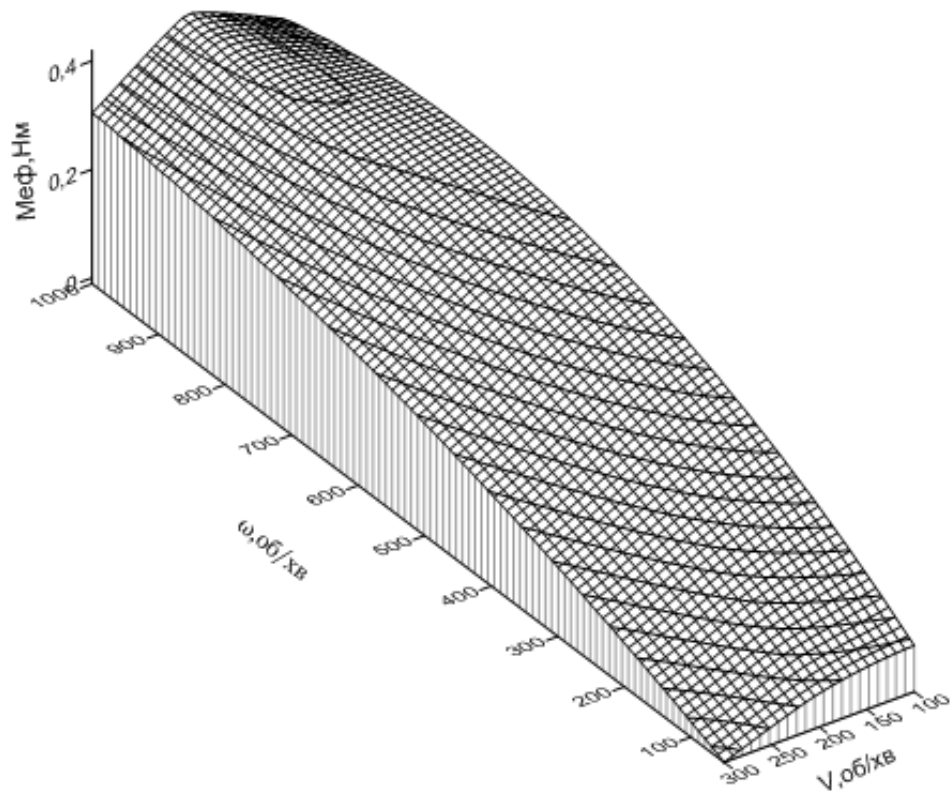


Рисунок 3.17 – Зміна величини ефективного моменту при $B=0,175\text{Тл}$ в залежності від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, V

Тобто при обробленні титанового сплаву частинки МАІ при великій швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни (V) більше 200 об/хв відбувається зниження величини ефективного моменту ($M_{\text{еф}}$), що свідчить про зниження сил тертя, яке може бути пов'язано з псевдозрідженням МАІ. Проте подібне зниження не обов'язково показує зниження ефективності оброблення, пов'язане зі зменшенням сил тертя, дотичних сил і повинно бути додатково досліджено.

На основі даного аналізу можна зробити висновки, що при магнітній індукції $B=0,175\text{Тл}$, найвища ефективність оброблення при швидкості обертання зразка навколо своєї осі (ω) від 800 об/хв та його обертання навколо кільцевої ванни $V=200\text{об/хв}$.

На рис. 3.18 при магнітній індукції $B=0,2125$ Тл показано стабільну роботу МАІ в діапазоні від 100 до 200об/хв титанового зразка навколо робочої зони типу «кільцева ванна» .

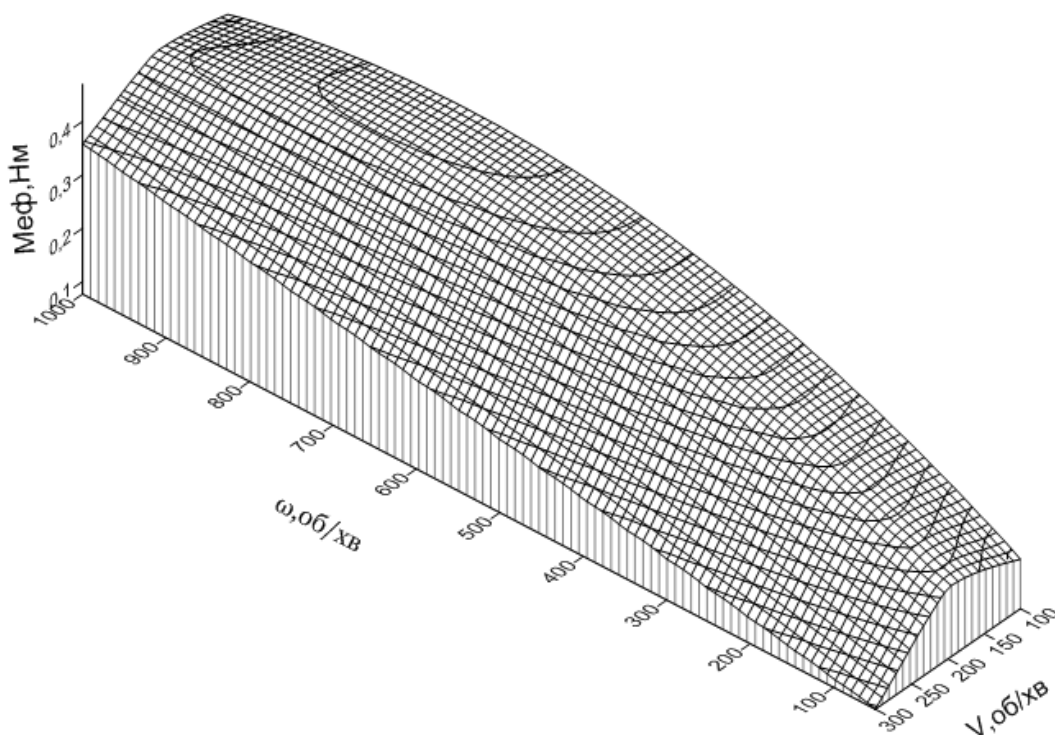


Рисунок 3.18 – Зміна величини ефективного моменту при $B=0,2125$ Тл в залежності від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, V

Із збільшенням швидкості обертання зразка навколо своєї осі (ω) від 50 до 1000об/хв величина $Meф$ - поступово зростає. При швидкості V понад 200 об/хв ефективність роботи різко знижується . На основі даного аналізу робимо висновки про найсприятливіші умови оброблення з високою ефективністю в діапазоні $V=100-200$ об/хв та швидкості обертання деталі навколо власної осі (ω) від 600 до 1000 об/хв.

Цікавим фактором є те, що в порівнянні з попередніми двома випадками на поверхні (рис.3.19) спостерігається зміна механізму контакту частинок із дослідним зразком.

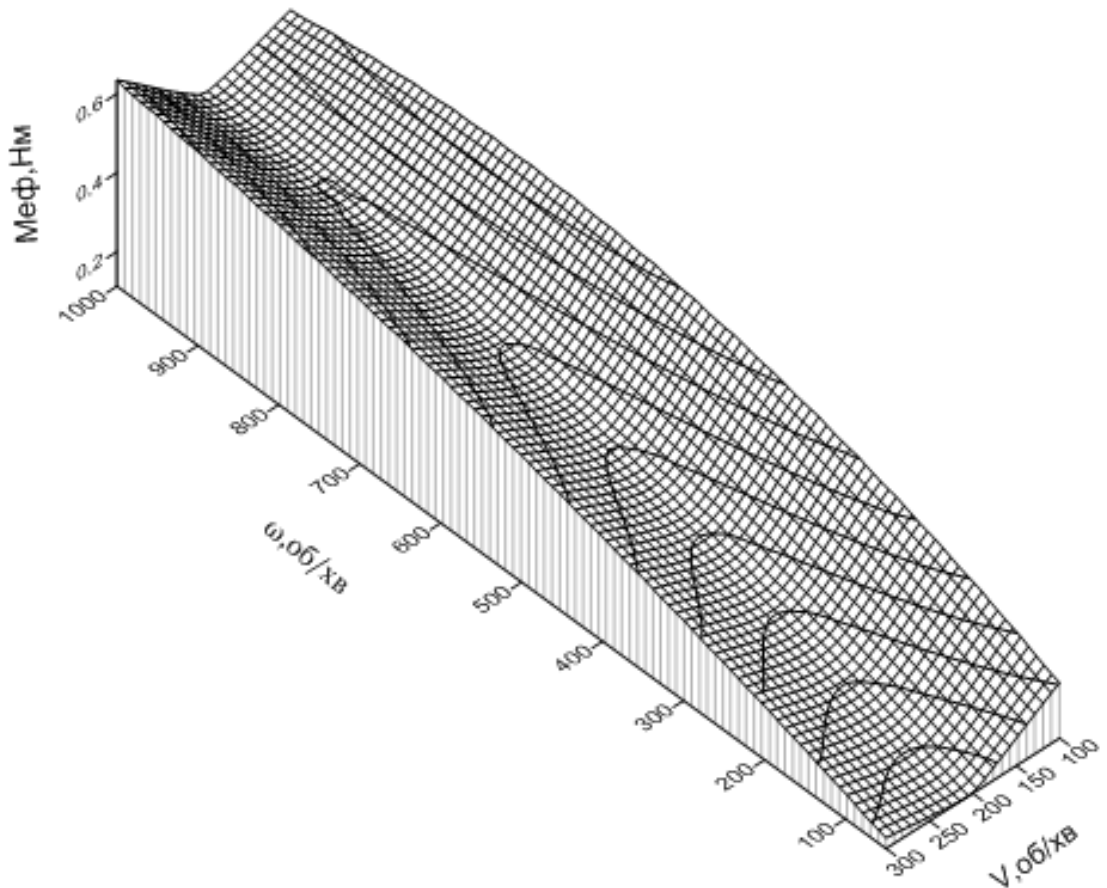


Рисунок 3.19 – Зміна величини ефективного моменту при $B=0,2375$ Тл в залежності від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, V

Ймовірно, що зниження величини ефективного моменту на ділянці при $V=100$ до $V=200$ об/хв, особливо при малих швидкостях обертання дослідного зразка навколо своєї осі зв'язано з дією мультиплікативних сил (рис 3.12). Можна припустити, що ці самі сили, але в зворотному напрямку вплинули на ефективність оброблення при швидкості обертання зразка $V=300$ об/хв навколо робочої зони.

Аналіз результатів дослідження титанових сплавів показав, що найбільш вдалим співвідношенням ефективність/стабільність є оброблення при магнітній індукції $B=0,175\text{Тл}$, що дорівнює $0,2125\text{ Тл}$, швидкості обертання навколо кільцевої ванни $V=100\dots200\text{ об/хв}$ та в діапазоні швидкостей обертання зразка навколо своєї осі ω від 600 до 1000 об/хв.

3.3.2 Залежність силових характеристик МАІ від швидкості обертання зразка з магнітної сталі 40Х13 навколо осі кільцевої ванни

Магнітна індукція $B=0,175\text{Тл}$

На рис. 3.19 показано досить високі показники величини ефективного моменту при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни сталевих зразків $V=100\text{ об/хв}$. При збільшенні цього показника ефективність оброблення знижується, відповідно при зменшенні швидкості обертання навколо власної осі (ω).

Ефективний момент досягає свого максимуму в точці де $V=100\text{об/хв}$ і $\omega=1000\text{ об/хв}$. В даному випадку можемо прогнозувати збільшення ефективного моменту і далі збільшуючи швидкість обертання зразка навколо власної осі (ω).

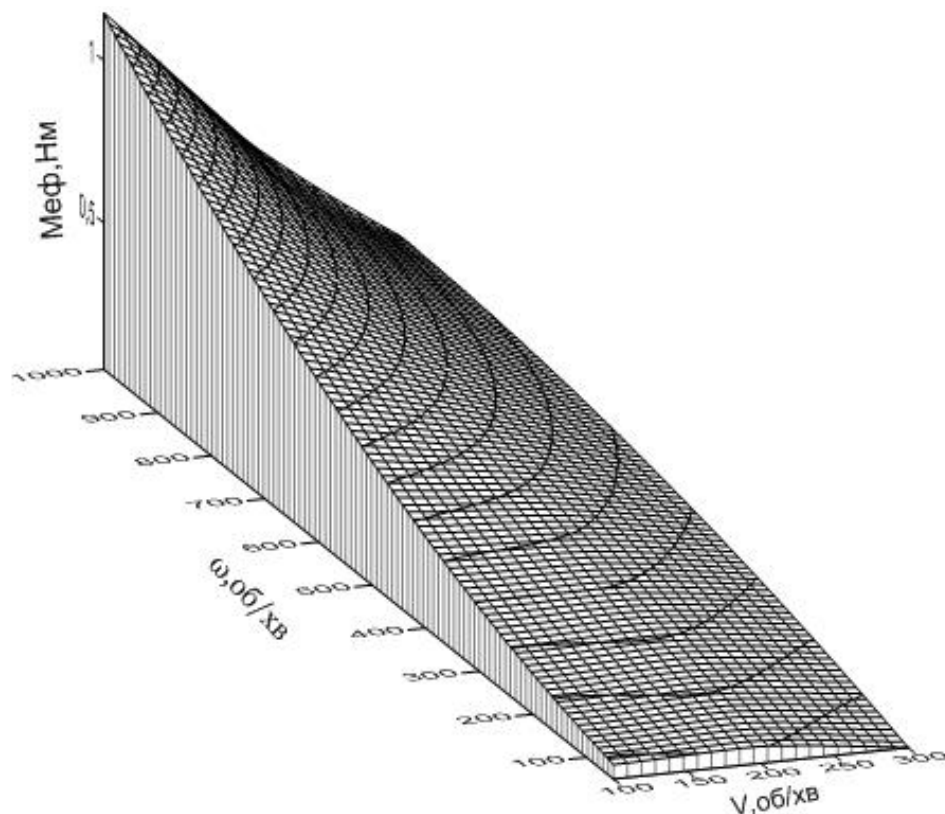


Рисунок 3.19 – Зміна величини ефективного моменту при $B = 0,175 \text{ Тл}$ в залежності від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, V
Магнітна індукція $B = 0,2125 \text{ Тл}$

При магнітній індукції $B = 0,2125 \text{ Тл}$ спостерігається зниження величини ефективного моменту при швидкості обертання дослідного зразка навколо робочої зони $V = 200 \text{ об/хв}$, особливо при низьких швидкостях обертання навколо власної осі (ω). Стабільний ріст ефективного моменту спостерігається при швидкості обертання дослідного зразка навколо робочої зони $V = 100 \text{ об/хв}$ на проміжку $\omega = 50 \dots 1000 \text{ об/хв}$.

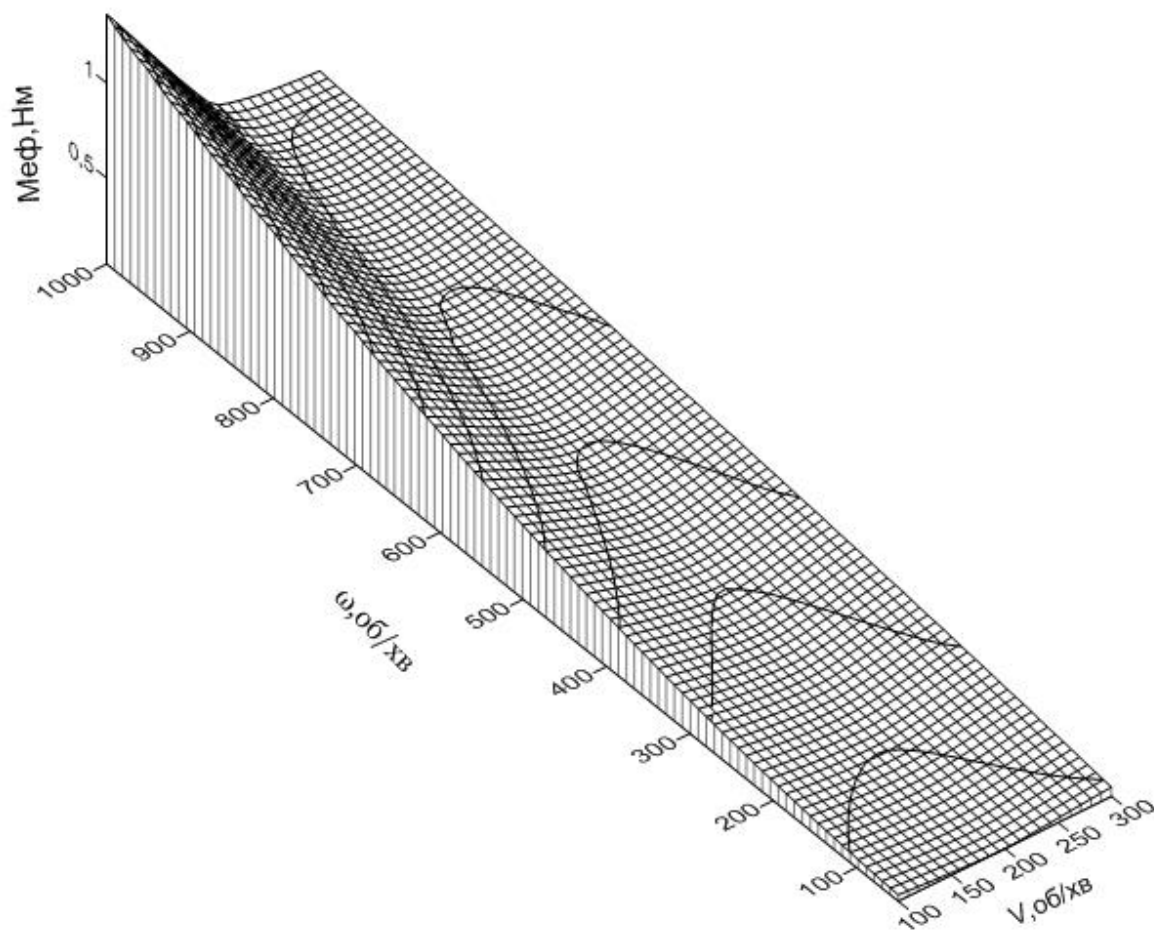


Рисунок 3.20 – Зміна величини ефективного моменту при $B=0,2125$ Тл в залежності від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, V

Аналізуючи дану поверхню (рис. 3.20) робимо висновки, що найбільша ефективність оброблення припадає на ділянку де швидкість обертання дослідного зразка навколо кільцевої ванни $V=100$ об/хв, а його обертання навколо власної осі (ω) знаходиться в діапазоні від 800 до 1000 об/хв. Проте ще потребує підтвердження по зміні параметрів шорсткості оброблення і масовому зніманню шару матеріалу.

Магнітна індукція $B=0,2375$ Тл

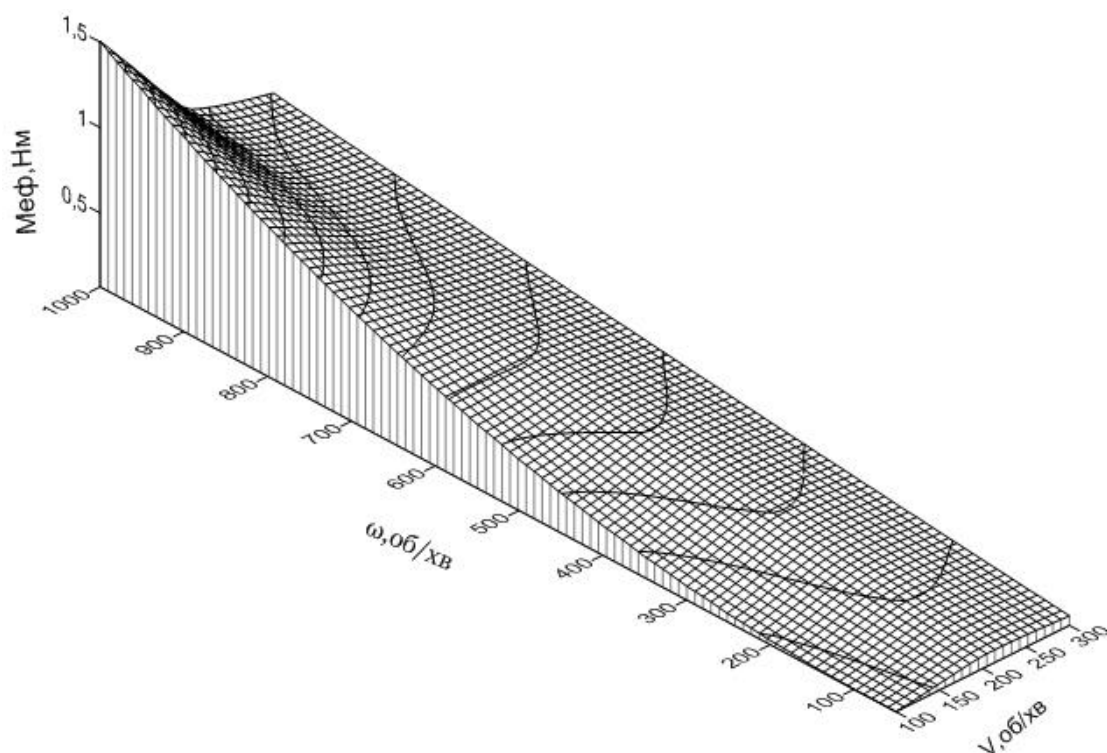


Рисунок 3.21 – Зміна величини ефективного моменту $B=0,2375$ Тл в залежності від швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, V

На поверхні (рис 3.21) показано, що величина ефективного моменту при малих швидкостях обертання навколо власної осі (ω) із збільшенням швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни (V) незначно збільшується. Але найбільша ефективність оброблення спостерігається в зоні, де $V=100$ об/хв, а ω змінюється від 800 до 1000 об/хв.

Аналізуючи випадок оброблення магнітної сталі 40Х13 можна сказати, що найбільш ефективне оброблення ми отримуємо при швидкості обертання зразка навколо осі робочої зони типу «кільцева ванна» $V=100$ об/хв, на високих швидкостях обертання зразка навколо своєї осі (ω) від 800 до 1000 об/хв. В даному випадку величина магнітної індукції практично не впливає на ефективність оброблення.

3.4 Висновки

1. Показано, що при таруванні робочої установки значення магнітної індукції практично не впливають на величину моменту на холостому ході двигуна, тому доцільно використовувати залежності, отримані при середньому значенні магнітної індукції $B=0,2125$ Тл.

2. Оброблення магнітних матеріалів доцільно проводити на невисоких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни, а саме $V=100$ об/хв та високих швидкостях обертання деталей навколо своєї осі (ω) в діапазоні від 800 до 1000 об/хв.

3. Парамагнітні матеріали, такі як титанові, алюмінієві, магнієві, вольфрамові, малібденові сплави необхідно оброблювати з наявністю немагнітного ВСЕ, щоб попередити витіснення МАІ в нижню частину робочої зони і забезпечити протягом усього циклу MAO формування стабільного МАІ в робочій зоні та збільшити ефективність оброблення деталей.

4. Встановлено, що при швидкості обертання дослідного зразка з титанового сплаву ВТ-8 при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв та значенні магнітної індукції $B=0,2375$ Тл має місце проявлення дії пондеромоторних сил або ефект псевдозрідження, де величина ефективного моменту різко падає.

5. Дія пондеромоторних сил спостерігається при швидкості обертання дослідного зразка при $B=0,2375$ Тл та при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=300$ об/хв в зворотньому до попереднього висновку значенні. Тому ці явища потребують додаткового дослідження.

РОЗДІЛ 4

ДІЯ СИЛ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В МАІ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ЗРАЗКІВ В РОБОЧІЙ ЗОНІ ТИПУ «КІЛЬЦЕВА ВАННА»

На попередньому етапі досліджень було показано, як змінюється ефективний момент ($M_{\text{еф}}$) в залежності від таких факторів, як швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни (V), величина магнітної індукції (B). При цьому вище виконана серія досліджень була спрямована на аналіз сил тертя між МАІ і оброблювальною поверхнею. Актуальним є і дослідження нормальних сил, що виникають в процесі МАО і створюються за рахунок «динамічного» навантаження без врахування сил, що виникають при додатковому обертанні зразків навколо власної осі. Експериментальні дослідження в цьому випадку напрямку суттєво обмежено, особливо для умов з кільцевим розташуванням робочих зон.

4.1 Умови проведення експерименту

Дослідну установку налаштували таким чином: до мінішпинделя приєднано пристрій для вимірювання тиску порошку на дослідний зразок. В пристрій за допомогою гвинтів приєднано дослідний зразок.

Дослід проводили на зразках:

- з парамагнітного титанового сплаву ВТ-8;
- магнітної сталі 40Х13.

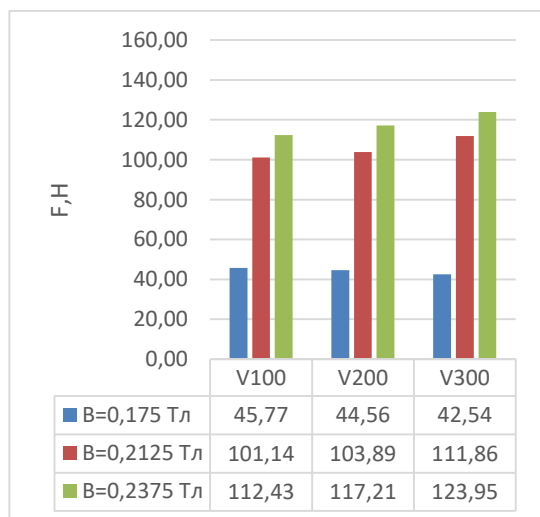
Експеримент спочатку виконано без використання немагнітного ВСЕ, а потім з ним. Дослідні зразки розташовувались паралельно осі кільцевої ванни та виконували навколо неї обертання при магнітній індукції $B=0,175; 0,2125; 0,2375$ Тл. Досліди виконувались 1хв при кожній швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=100, 200, 300$ об/хв. Для подальших розрахунків значення були усереднені. Спочатку експеримент проводили для

титанового зразка, де в якості МАІ використовували ПОЛІМАМ-Т з розміром зерна 200/100 та 400/315 мкм.

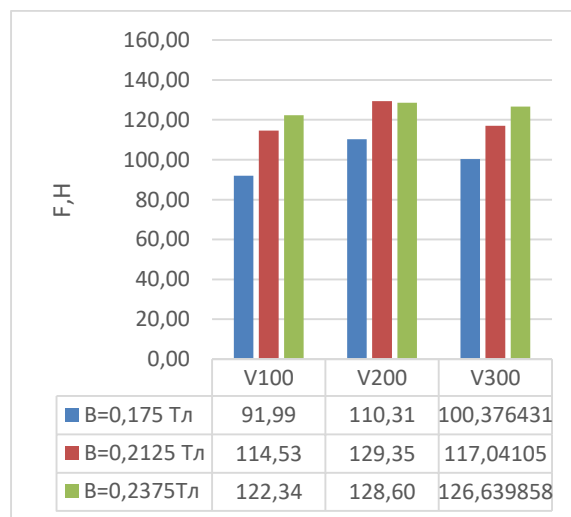
Отримані дані за принципом роботи пристрою (розділ 2.4.1) за допомогою програми EXEL для подальшого аналізу перетворили в стовбчикові діаграми.

4.2 Вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни при різних значеннях магнітної індукції на оброблення зразків з сплаву ВТ-8

На рис 4.1 показано як змінюються сили тиску, що діють на оброблювану поверхню в залежності від величини швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни V при різних значеннях магнітної індукції.



а)



б)

Рисунок 4.1 – Вплив швидкості обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни, де в якості МАІ використано ПОЛІМАМ-Т 200/100 мкм: а) без використання ВСЕ; б) з використанням ВСЕ

Порівнюючи результати експериментів з використанням ВСЕ та без нього, можемо зробити висновок, що сили різко ростуть. Це пояснюється тим, що за допомогою ВСЕ ми відновлюємо МАІ і забезпечуємо стабільну

його роботу. На рисунку 4.2 показано як поводить себе МАІ при обробленні титанових сплавів з використанням немагнітного ВСЕ та без нього.



а)



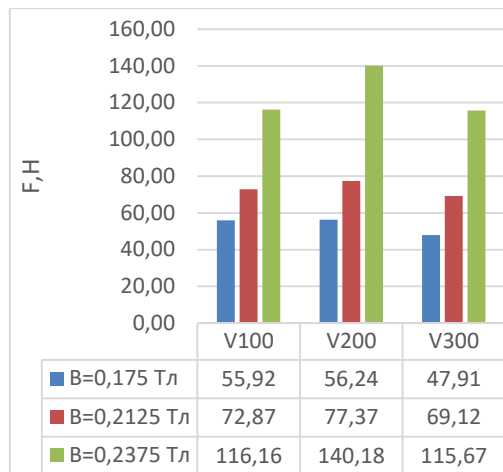
б)

Рисунок 4.2 – Поведінка МАІ при обробленні титанового зразка

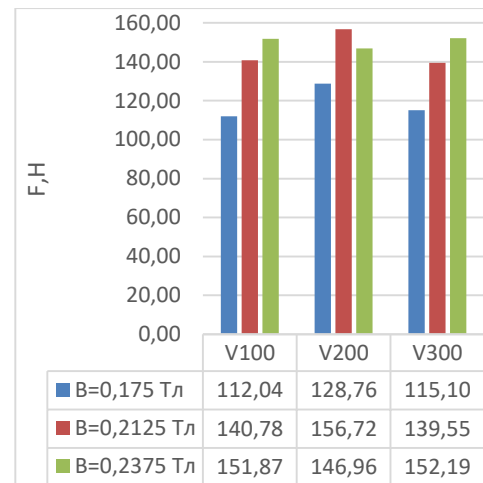
а) без використання ВСЕ б) з використанням ВСЕ

Аналогічні результати отримано при обробленні , де в якості МАІ було використано ПОЛІМАМ-Т 400/315мкм. Результати показані на діаграмі (рис.4.3).

Результати показали, що при визначені реального силового впливу, розмір частинок МАІ має вагоме значення. Так, при використанні МАІ з розміром зерна 200/100 величина сил максимально досягає 129 Н, а при використанні МАІ з розміром зерна 400/315 – 156Н.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Вплив швидкості обертання дослідного зразка навколо осі кільцевої ванни, де в якості МАІ використано ПОЛІМАМ-Т з розміром зерна 400/315 мкм: а) без використання ВСЕ; б) з використанням ВСЕ

Аналізуючи залежність оброблення титанового від швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни, можемо зробити висновок, що із її збільшенням та відповідно із збільшенням значення магнітної індукції (В) величина сили (F) зростає. Установлено, що при швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв та магнітній індукції $B=0,2125$ Тл величина досягає максимальних значень. В розділі 3.2.2 при цих же умовах спостерігається таке ж явище. Це може означати, що при даних умовах має місце ефект псевдозрідження або присутня дія пондеромоторних сил.

4.3 Вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни при різних значеннях магнітної індукції на оброблення зразків зі сталі 40Х13

Перший експеримент для зразка з магнітної сталі 40Х13 при швидкості обертання навколо кільцевої ванни $V=100$ об/хв та магнітній індукції $B=0,175$ був виконаний і визначено максимальне значення сили $F=100,2$ Н.

При виконанні наступного експерименту $V=100$ об/хв $B=0,2125$ сила досягла свого максимального значення $F=200,7$ Н . Тензодатчик , значення якого максимально може досягати 200 Н не призначений для таких великих сил, подальші досліді виконувати неможливо. Рекомендовано використати тензодатчик з більшим максимальним значенням сили, наприклад $F_{\max}=500$ Н та виконати експеримент повторно.

При розрахунку тензодатчика на міцність ми не врахували, що сталь-магнітна, та під дією магнітного поля в процесі оброблення до неї приєднуються частинки МАІ, що робить самий процес високонавантажувальним.

В результаті проведених експериментальних досліджень доведено, що значення силових характеристик, що діють в МАІ при обробленні деталей , а особливо магнітних значно велике . Тому для раціонального оброблення та підвищення продуктивності оброблення необхідно їх враховувати.

4.4 Висновки

1. При обробленні парамагнітного титанового сплаву ВТ-8 встановлено, що від швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни, можемо зробити висновок , що із її збільшенням та відповідно із збільшенням значення магнітної індукції (B) величина сили (F) зростає.

2. В результаті виконаних експериментів доведено, що значення силових характеристик, які діють в МАІ в робочій зоні типу «кільцева вана» при обробленні феромагнітних значною мірою вагомі. Тому для раціонального оброблення та підвищення продуктивності оброблення необхідно їх враховувати.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1 Маркетинговий аналіз стартап проекту

В даному розділі приводиться маркетинговий аналізу стартап-проекту для визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

Опис ідеї проекту

В ході науково-технічного прогресу було винайдено безліч методів фінішного оброблення. Більшість передових виробництв, таких як машинобудування, авіабудування, автомобілебудування, приладобудування в значній мірі в якості фінішного оброблення застосовують МАО. Існує багато методів МАО, та метод оброблення деталей в кільцевій ванні має ряд переваг перед іншими. Вчені України та світу досліджували силові характеристики, що діють в магнітно-абразивному інструменті в робочій зоні. Були розроблені певні методики, виведені залежності, формули розрахунку, але реальні значення силових параметрів не визначено. Тому ідея визначення реальних значень силових параметрів спрямована на підвищення продуктивності оброблення, надійності прийняття технологічних рішень та впровадження умов оброблення.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Визначення реальних значень силових характеристик МАІ в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих зазорів	1.Машинобудування	1.Зниження затрат на виготовлення деталей (за рахунок покращення стійкості інструменту) 2.Покращення якості оброблених деталей (за рахунок кращої якості та мікрогеометрії РІ) 3.Забезпечення тривалого терміну експлуатації
	2.Автомобілебудування	1.Надійність конструкції 2.Підвищення якості деталей 3. Підвищення точності деталей.
	3.Верстатобудування	1.Забезпечення високої точності 2.Надійність 3.Довговічність 4. Раціональність
	4. Стоматологія	1. Забезпечення відновлення твердосплавного інструменту. 2.Довговічність

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких
та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари /концепції конкурентів				W	N	S
		Магні-тно- абразивне оброблення	Струме- нево- абразивне оброблен ня	Тягове шліфування	Обробле-ння абразивними щітками			
1	Собівартість процесу	S	N	W	w	2	1	1
2	Вартість устаткування	W	S	N	N	1	2	1
3	Витрати на оплату праці	N	N	N	N		4	
4	Продуктивніст ь процесу	S	N	N	N		3	1
5	Якості	S	N	W	S	1	2	2
6	Змінні витрати	N	W	N	W	2	2	
7	Доступ до ресурсів	N	S	S	W	1	1	2
8	Стійкість	S	W	W	W	3		1

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою схемою буде реалізовано ідею проекту?
- чи існують такі методики, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступне обладнання для досягнення цілей авторам проекту?

Таблиця 5.3 Технології здійснення ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технологія її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Реалізація визначення силових характеристик ,що діють в МАІ в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих зазорів	1.Підбір оптимальних умов проведення експерименту спираючись на попередні дослідження	Наявна	Технологія доступна, має низькі показники точності
2		2.Експерементальні дослідження	Наявна	Доступна і довготривала
3		3.Аналітичне визначення з урахуванням попередніх табличних значень	Наявна	Доступна. Має високу точність та надійність результатів.
Обрана технологія експериментальних дослідження				

5.3 Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	300000/10700
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає

№	Показники стану ринку	Характеристика
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція з великими гравцями на ринку. Спосіб не всім відомий потрібна реклама.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандартні процедури та вимоги зазначені в діючих ГОСТ , ДСТУ та ISO.
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Рентабельність може досягати 20-30% .

За попереднім оцінюванням ринку робимо висновок, що ринок є привабливим для входження хоч і має перепони у вигляді високої конкуренції та маловідомого методу

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Необхідно отримати величини, які забезпечать достатню стабільність і ефективність оброблення	1.Машинобудівна промисловість та верстатобудування (Значення силових характеристик будуть використані при виготовлені обладнання для МАО, а саме двигунів верстатів)	Обсяги виробництва : одиничне ; терміни постачання; умови оплати; зручність використання; надійність результатів	Забезпечення продуктивності та раціональності оброблення ; Цінова категорія

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. №№ 5.6-5.7). Фактори в таблиці подаються в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Обладнання	Підприємство задовольняється старими стандартами у проектуванні обладнання	Продемонструвати, як за допомогою реальних значень силових характеристик можна уникнути виходу обладнання з ладу та раціонального використання його потужності
2	Конкуренція	Високий рівень конкуренції, що вже виконують фінішне оброблення	Продемонструвати покупцю якість деталей, оброблених МАО Продемонструвати вищі показники по працездатності та стійкості, запропонувати безкоштовне оброблення одного зразка, що надає покупець для подальшого порівняння
3	Постачальники	Високі ціни постачальників	Розбити ціну по траншам. Продаж у лізинг.
4	Технічний прогрес конкурентів	Поява нової технології обробки РІ у конкурентів, що буде дешевшою і ефективнішою	Розробка нової технології або удосконалення існуючої.
5	Фінансова нестабільність	Перепади курсу гривні можуть привести до негативних наслідків	Працювати з дрібними замовленнями, поки ризик втрат не стане меншим

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новітня технологія	Використання нової технології обробки РІ забезпечить відрив від конкурентів.	Забезпечити подальший розвиток технології. Знизити витрати на виробництво.
2	Довгострокові перспективи розвитку	Збільшення обсягу замовлень	Побудова більшої кількості верстатів
3	Збільшення ринку	Збільшення ринку та підприємств, що займаються обробкою РІ	Розширення маркетингової компанії.

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл.5.8).

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: - олігополія	На ринку існує кілька основних конкурентів, які пропонують однотипні технології	Створення нетипової технології (з підвищеними показниками якості)
2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Конкуренти представлені виробниками з різних країн	Робити наголос на якість, щоб країна походження товару не мала великого значення
3. За галузевою ознакою - галузева	Продукти що виготовляються конкурентами використовуються для механічних операцій	Розширити номенклатуру інструменту, для більшого заповнення ринку
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Однорідні види продукту подібного споживання, але з різними характеристиками	Розширити технічні можливості товару
5. За характером конкурентних переваг - не цінова	Товари конкурують ціною, та деякими відмінностями по фізико-механічним властивостям	Запровадити товар для економ-сегменту ринку, дотримувати високу якість продукту.
6. За інтенсивністю - марочна	Виробники представляють аналогічну продукцію	Створення нетипового товару (з розширеним функціоналом)

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера,) (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Струменево-абразивне оброблення; Тягове шліфування; Оброблення абразивними щітками	Мала кількість потенційних конкурентів так як уступають в якості інструменту	Постачальники не потрібні	Клієнти мають перевагу через присутність конкурентів	Присутність товарів, що частково задовольняють клієнтів
Висновки	Визначити оптимальні режими оброблення MAO	Гнучкість цін, мала ціна для першого ознайомлення з технологією	Незалежність від постачальників.	Надавати клієнтам значення, де процес оброблення буде найбільш продуктивним	Цінова політика. Лояльність до споживачів Маловідомість даного методу

Провівши аналіз, можна сказати, що зважаючи на підвищену конкуренцію є клієнти, які потребують високоякісного продукту.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в (табл. 5.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. № 5.6-5.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 5.10

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Підвищення ефективності оброблення	Дозволяє підвищити ефективність та стабільність оброблення
2	Цінова політика	Приблизно одна цінова категорія при реальних умовах в порівнянні з конкурентами
3	Рациональне використання потужності обладнання	Зменшення витрат на виробництво
4	Клієнтоорієнтованість	Задовільнення будь-яких обсягів по замовлення клієнтів.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) виконуємо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін мого проекту

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Підвищення ефективності оброблення	18			-1	0			
2	Цінова політика.	19		-2					
3	Раціональне використання потужності обладнання	20	-3						
4	Клієнтоорієнтованість	18						+2	
5	Сервіс	17					+1		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 5.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
<ul style="list-style-type: none"> - Цінова політика - наявність переваг перед конкурентами; -якість ; -ефективність . 	<ul style="list-style-type: none"> - Відсутність реклами - залежність від ринку машинобудування. - недостатньо високий рівень внутрішньої організації
Можливості: <ul style="list-style-type: none"> - низька активність конкурентів; - поява нових технологій; - розширення асортименту можливих товарів; - зростання попиту; - зменшення числа конкурентів за рахунок появи бар'єрів входу на ринок та ін. - обслуговування додаткових груп клієнтів 	Загрози: <ul style="list-style-type: none"> - Страх клієнтів перед новим продуктом. - уповільнення росту ринку; - зміна потреб покупців; - жорстокість конкуренції; - надходження на ринок альтернативних товарів; - поява на ринку нових конкурентів;

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуємо з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Зменшення собівартості	Малоймовірно	5-7 місяців
2	Інвестиції	Високоймовірно	7-12 місяців
3	Кредит	Середня ймовірність	4-6 місяців
4	Використання власних коштів	Низька, власних коштів вистачить тільки для створення пристрою.	1-1,5 років
5	Краудфандинг	Середня, отримання ресурсів залежить від маркетингової стратегії та реклами. Неможливо спрогнозувати успіх краудфандингової компанії.	1 рік

Обираємо альтернативу використання інвестицій для розробки установки та наступним виводом проекту на крудфаундингову платформу, через короткі строки реалізації та високу ймовірність отримання таких ресурсів.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Визначаємо стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

Таблиця 5.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Машинобудування, автомобілебудування, верстатобудування.	Більша частина готова прийняти продукт	Прихований попит (потенційний). Багато споживачів можуть мати велику потребу, яке не може бути задоволене наявними на ринку продуктами.	Інтенсивна конкуренція.	Має великий потенціал, збільшення конкурентних переваг.
Як цільові групи обрано: Підприємства машинобудівної, верстатобудівної та автомобілебудівних галузей, що часто використовують у своєму виробництві фінішне оброблення різних деталей де потрібна висока продуктивність виробництва					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо цільову групу, до якої входять підприємства машинобудівної, верстатобудівної та авіабудівних галузей, та стратегію охоплення ринку - стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл.5.15).

Таблиця 5.15 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Використання запропонованої технології обробки, покращення технологічної підготовки виробництва, за рахунок інвестицій	Поступове зайняття домінуючої позиції на ринку.	Відмінні властивості товару та завоювання прихильності Лояльна цінова політика. Спрямованість на конкретні проблеми споживача.	Стратегія диференціації

Обрана стратегія диференціації передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Переваги стратегії:

- по відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність;
- прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів;
- підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника, в нашому випадку від зростання залежності від висококваліфікованих працівників;
- відмінні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників.

Далі обираємо стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця. 5.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Запропонована технологія є першопрохідцем на ринку	Компанія шукатиме як нових клієнтів так і показувати існуючим у конкурентів свої переваги. Проект направлений на ринок, що потребує високої продуктивності виробництва Після стабілізації компанія може відбирати споживачів в конкурентів	Ні, проект має повністю нові методики та технології	Стратегія заняття конкурентної ніші. Компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця. 5.17 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Продуктивність, стабільність, раціональне використання обладнання	Стратегія заняття конкурентної ніші.	Нові технологічні рішення, цінова політика, використання нових досягнень науки та техніки, універсальність, наглядність.	Продуктивно стабільно, довговічно.

В результаті узгоджуємо систему рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрями роботи стартап-компанії на ринку. Обрана стратегія диференціації передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів.

5.5 Маркетингова програма стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.18 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Підвищення продуктивності оброблення, стабільність оброблення, раціональність використання обладнання, запобігання виходу обладнання з ладу	Менші затрати на оброблення, цілісність оброблюваних деталей та обладнання	Реальні значення сил, що діють в МАІ при МАО. У конкурентів є лише припущення
2	Цінова політика	Менші затрати	Зважаючи на менші капіталовкладення, порівняно з конкурентами, ціна одиниці готового продукту нижча.

Надалі розробляємо три рівневу маркетингову модель товару: уточнюємо ідею продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Підвищена ефективність оброблення з мінімальним використанням ресурсів
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: 1. Економічні. 2. Технологічні.
	Якість: стандарти, нормативи, параметри отриманого інструменту
	Пакування: Технологічна документація.
	Марка: назва організації-розробника
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Консультація клієнтів про можливості використання та переваги запропонованої технології.
	Після продажу: Підтримка клієнта, тісна співпраця і можливість регулювання вихідних характеристик МАІ. Постійне удосконалення з урахуванням потреб клієнта.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: За допомогою патентування (захист інтелектуальної власності).	

Визначимо цінові межі, якими будемо керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.20).

Таблиця. 5.20 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	При відсутності товарів-замінників середня ціна 20000 за надання даних виробництву	Аналогів не існує	Середній дохід наших споживачів становить 35 тис. грн на рік та вище	Приблизна ціна 15000-20000 за надання вироюництву даних

Визначаємо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця. 5.21 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Закупівля для досягнення кращої продуктивності, зменшення витрат на оброблення	Постачання нових , більш точних значень, технологічний супровід виробництва. Вдосконалення методики.	Комбінований канал збуту (здійснюється через організацію з загальним капіталом фірми розробника і незалежної фірми).	Інтенсивний вид збут (проникнення в найбільш можливу кількість каналів збуту).

Розробляємо концепцію маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Таблиця 5.22 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Визнання що до потреби підвищення ефективності виробництва Економія на обробленні Визнання раціонального використання обладнання та можливостей його довговічності	Галузеві ярмарки Виставки Інтернет Консультація в реальному часі Сайт виробника	Задоволення потреб клієнта відстеження ринкових потреб, підстроювання під окремі вимоги покупців	Закликати покупців до використання саме даного методу фінішного оброблення через його комплексне підвищення властивостей PI	В рекламі робити акцент на економію при використанні цих даних Підвищення продуктивності виробництва. Можливість оброблення декількох деталей одночасно Скорочення часу оброблення деталей

При розробці проекту було встановлено:

1. Рентабельність проекту яка сягає 30%, також присутність попиту на ринку який є постійно зростаючим
2. Проект є перспективним оскільки потенційні користувачі це весь спектр виробництва де присутнє фінішне оброблення, можливість широкого впровадження в будь-яку галузь машинобудування.
3. Проект є конкурентоспроможним, проте можуть виникнути проблеми на початкових етапах розвитку через те, що метод та послуга мало відома що насторожить клієнтів.
4. Для впровадження проекту для виходу на ринок доцільно залучення інвесторів, щоб надати більших оборотів проекту. Строк реалізації 1 ... 1.5 років
5. Розвиток проекту є доцільним оскільки ринок збуду постійно зростає за рахунок відкриття нових підприємств по обробленні металу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В дисертації зроблено висновки, що при таруванні робочої установки значення магнітної індукції практично не впливають на величину моменту на холостому ході двигуна, тому доцільно використовувати залежності, отримані при середньому значенні магнітної індукції $B=0,2125$ Тл.
2. В роботі встановлено, що оброблення феромагнітних матеріалів доцільно проводити на невисоких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни, а саме $V=100$ об/хв та високих швидкостях обертання деталей навколо своєї осі (ω) в діапазоні від 800 до 1000 об/хв.
3. Експериментально доведено, що для оброблення феромагнітних матеріалів при швидкостях обертання навколо робочої зони кільцевого типу понад 200 об/хв доцільно використовувати немагнітний відновлювальний стержневий елемент оскільки при його наявності величина ефективного моменту (M_{ef}) збільшується в 1,5-2рази.
4. Парамагнітні матеріали, такі як титанові, алюмінієві, магнієві, вольфрамові, молібденові сплави необхідно оброблювати з наявністю немагнітного ВСЕ, щоб попередити витіснення МАІ в нижню частину робочої зони і забезпечити протягом усього циклу МАО формування стабільного МАІ в робочій зоні та збільшити ефективність оброблення деталей.
5. Встановлено, що при швидкості обертання дослідного зразка з титанового сплаву ВТ-8 при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни $V=200$ об/хв та значенні магнітної індукції $B=0,2375$ Тл має місце проявлення дії пондеромоторних сил або ефект псевдозрідження, де величина ефективного моменту різко падає.
6. Дія пондеромоторних сил спостерігається при швидкості обертання дослідного зразка при $B=0,2375$ Тл та при швидкості обертання

навколо осі кільцевої ванни $V=300$ об/хв в зворотньому до попереднього висновку значенні. Тому ці явища потребують додаткового дослідження.

7. При обробленні титанового сплаву спостерігається наступне явище: частинки МАІ при великій швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни (V) більше 200 об/хв відбувається зниження величини ефективного моменту (M_{ef}), що свідчить про зниження сил тертя, яке може бути пов'язано з псевдозрідженням МАІ. Проте подібне зниження не обов'язково показує зниження ефективності оброблення, пов'язане зі зменшенням сил тертя, дотичних сил і повинно бути додатково досліджено.

8. При обробленні парамагнітного титанового сплаву ВТ-8 встановлено, що від швидкості обертання зразка навколо осі кільцевої ванни, можемо зробити висновок, що із її збільшенням та відповідно із збільшенням значення магнітної індукції (B) величина сили (F) зростає.

9. В результаті виконаних експериментів доведено, що значення силових характеристик, які діють в МАІ в робочій зоні типу «кільцева вана» при обробленні феромагнітних значною мірою вагомі. Тому для раціонального оброблення та підвищення продуктивності оброблення необхідно їх враховувати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов/Барон Ю.М. - Л.:Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей: Минск БГАТУ 2012
3. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08/Майборода Виктор Станиславович. – Киев, – 1988. – 170 с.
- 4 . Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
5. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики/Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
6. Руденко П.А. Отделочные операции в машиностроении: Справочник/П.А. Руденко, М.Н. Шуба, В.А. Огнivec и др.: под общей ред. П.А. Руденко. - К.: Техніка, 1985. - 136 с.
7. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле/ Барон Ю.М. - Л. Машиностроение. 1975. - 127 с.
8. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка деталей с консольным закреплением на установке типа кольцевая ванна / В.С. Майборода, В.Н. Гейчук // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010 г. в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Т.2. – С. 130-134.
9. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка многогранных твердосплавных пластин/В.С. Майборода, В.Я. Лебедев, А.Н. Климов //Респ.межвед. сб. науч. тр.: под. ред. Б.М. Хрусталева. Минск:

Машиностроение. – 2009. – Вып. 25. – С. 85-89.

10. 273. А.с. 859126 СССР, МКИЗ В 24 В 31/10. Устройство для магнитноабразивной обработки/П.И. Ящерицын, В.В. Смоляк, Ю.А. Базарнов (СССР). – № 2203578/25-08; заявл. 14.08.79; опубл. 10.10.81; бюл. № 32.

11. Майборода В.С. Вплив змашувально-охолоджуючих технологічних середовищ (ЗОТС) на тріботехнічні властивості порошкового магнітноабразивного інструменту/В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Ивановський//Технологія і техніка друкарства: зб. наук. праць. К.: ВПІ НТУУ "КПІ". – 2004. Вип. 4(6). – С. 56-67.

12. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - Київ, 2015. - 25 с.

13. Майборода В.С. Дослідження характеристик внутрішнього тертя сумішей магнітно-абразивних порошків у магнітному полі // Порошкова металургія.- 2000. -№3-С.62-67.

14. Майборода В.С. Внутрішнє тертя у магнітно-абразивному інструменті // Наукові вісті НТУУ «КПІ» - №3-2000.-С.62-67.

15.Реологические характеристики магнитно-абразивных порошков в магнитном поле. / В.С. Майборода , Н.Л. Тараненко , В.Я.Верменко // Порошковая металлургия.-1994-№12-с.62-66

16. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода В. С. – Київ, 2001. – 404 с.

17. Пат. 104328 Україна В24 В31/112 (2006.01) МПК. Спосіб магнітно-абразивного оброблення / Майборода В.С., Гейчук В.М., Джулій Д.Ю., Ткачук І.В.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. №

a201201745; заявл. 16.02.2012; опубл. 27.01.2014; бюл. № 2/2014.

18. About ANSYS URL: <https://www.ansys.com/about-ansys> (дата звернення 11.11.2018)

19. Решение геологических задач с применением программного пакета SURFER. URL: http://window.edu.ru/resource/833/74833/files/Prakticum_SURFER.pdf (дата звернення 14.11)

20. Майборода В.С. Вплив змашувально-охолоджуючих технологічних середовищ (ЗОТС) на тріботехнічні властивості порошкового магнітноабразивного інструменту/В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський//Технологія і техніка друкарства: зб. наук. праць. К.: ВПІ НТУУ "КПІ". - 2004. Вип. 4(6). - С. 56-67.

21. Майборода В.С. Дослідження особливостей тертя порошкового магнітно-абразивного інструменту об поверхню деталей при магнітноабразивній обробці/В.С. Майборода, О.А. Хоменко, В.М. Гейчук, Д.В. Белановський, Н.В. Ульяненко//Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – 2001. – Вып. 41. – С. 113-119.

22. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. .канд. техн. наук: 05.02.08/Майборода Виктор Станиславович.– Киев, - 1988. – 170 с.

23. Майборода В.С. Формування магнітно-абразивного інструменту в кільцевих щілинах з різною формою поперечних перерізів робочих зон при магнітно-абразивній обробці кінцевих та осьових інструментів/ В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський//Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". 361 Машинобудування. – 2006. – Вип. 49. – С. 153-164.

24. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ...докт. техн. наук: 05.03.01/Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с.

25. Майборода В.С. Внутрішнє тертя у магнітно-абразивному інструменті//Наукові вісті НТУУ "КПІ" - 2000. – № 3. – С.40-43.

26. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей порошків. Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць ЖДТУ. – Житомир.: ЖДТУ. – 2009. – Вип.6. – С. 144-159.

27. Сакулевич Ф.Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей/ Ф.Ю. Сакулевич, Л.К. Минин, Л.А. Олендер. – Мн.: Высшэйшая школа, 1977. – 288 с.

28. Сакулевич Ф.Ю. Магнитно-абразивное полирование сферических поверхностей/ Ф.Ю. Сакулевич, Л.А. Олендер. – Минск: ФТИ АН БССР, 1976. – С. 50-54.

29. Сакулевич Ф.Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка/ Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожуро. – Мн.: Наука и техника. – 1978. – 168 с.

30. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки/ Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.

31. Сакулевич Ф.Ю. Сущность и физико-механические особенности магнитно-абразивной обработки/Ф.Ю. Сакулевич, В.И. Жданович//Новые методы испытания и обработки материалов. Мн., Наука и техника, 1975. С. 135-146.